

Study of the Antonov An-225 structure and reproduction of a 1:50 scale model

Treball Final de Grau



Treball realitzat per:
Lluc Rifà Vergés

Dirigit per:
Oriol Lordan

Grau en Enginyeria en Vehicles Aeroespacials
Terrassa, 30/06/2020



Agraïments

Vull donar les gràcies als meus pares per el suport incondicional que m'han donat durant tota la meva formació. I una menció molt especial als meus companys Joan, Jordi, Kevin i Pau per l'ajuda que han brindat durant tota la carrera.

Resum

L'Antonov An-225 és un avió únic i conegut arreu del món a causa de la seva imponent mida i a la funció que va desenvolupar durant el programa espacial soviètic. Aquest estudi investiga l'estructura aeronàutica que permet la construcció d'un avió com aquest amb la finalitat de poder-ne recrear un model a escala 1:50. Per a fer-ho s'han analitzat plànols, imatges i informació de disseny d'aeronaus per a comprendre la disposició estructural de l'An-225; i mitjançant eines de disseny gràfic, s'ha recreat un model tridimensional a l'escala requerida. Des d'aquest model s'han pogut obtenir plànols a partir dels quals tallar les peces de la maqueta amb tall làser damunt fusta; un cop obtingudes les peces s'ha muntat el model a escala de l'Antonov An-225. Aquest estudi ha permès l'anàlisi de l'estructura d'una aeronau tan singular com l'An-225, al mateix temps que aprofundir a les diferents tècniques i solucions de disseny que es troben en la producció d'avions de fuselatge ample com és aquest model d'Antonov.

Resum

The Antonov An-225 is a unique aircraft known around the world due to its imposing size and the function it developed during the Soviet space program. This study investigates the aeronautical structure that allows the construction of an aircraft like this in order to be able to recreate a 1:50 scale model. To do this, plans, images and aircraft design information have been analyzed to understand the structural layout of the An-225; using graphic design tools, a three-dimensional scale model has been recreated. From this model it has been possible to obtain plans from which to cut the parts of the model with laser cutting on wood; once the pieces have been obtained, the scale model of the Antonov An-225 has been assembled. This study has allowed the analysis of the structure of an aircraft as distinctive as the An-225, while delving into the different techniques and design solutions found in the production of wide-body aircraft such as this Antonov model.

Declaració d'honor

Declaro que,

la feina d'aquest Treball de Fi de Grau és íntegrament meva,

cap part d'aquest Treball de Fi de Grau s'ha agafat de la feina d'altres persones sense donar-los crèdit,

totes les referències han estat correctament citades,

Entenc que un incompliment d'aquesta declaració em deixa sotmès a les accions disciplinàries previstes per *la Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH*.

Lluc Rifà Vergés

30 de juny de 2020

Títol del Treball de Fi de Grau: *Study of the Antonov An-225 structure and reproduction of a 1:50 scale model*

Índex

Índex de taules	iv
Índex de figures	v
1 Introducció	1
1.1 Objecte	1
1.2 Abast	1
1.3 Requeriments	2
1.4 Justificació	3
2 L'Antonov An-225	5
2.1 Història	5
2.2 L'Antonov An-225 en l'actualitat	7
2.3 El futur del <i>Mriya</i>	8
2.4 Especificacions	9
3 Disseny del model a escala	13

3.1	Mètode de tall	13
3.1.1	Requeriments del tall làser	14
3.2	Materials	14
3.3	Disseny del model amb <i>SolidWorks</i>	16
3.3.1	Recopilació d'informació	17
3.3.2	Disseny del fuselatge	20
3.3.3	Diseny de la comporta	29
3.3.4	Disseny de l'estabilitzador	31
3.3.5	Disseny de l'ala	37
3.3.6	Acoblatge del model a escala	43
4	Tall del model a escala	47
4.1	Selecció del tall làser	47
4.2	Plànols per al tall làser	48
5	Muntatge del model a escala	51
6	Impacte ambiental	65
7	Conclusions	67
	Bibliografia	68

Índex de taules

2.1	Especificacions de l'Antonov An-225. Dades extretes de [1] [2] [3]	10
2.2	Rendiment de l'Antonov An-225. Dades extretes de [1] [2] [3] .	11
3.1	Làmines de fusta disponibles per al tall làser, marcades de color groc aquelles que s'han escollit per a la construcció del model a escala. Dades extretes del catàleg [4].	15
3.2	Densitats dels diferents materials. Dades extretes del catàleg [5]	15
6.1	Materials utilitzats durant el muntatge del model. Les mides dels taulers es poden consultar a la taula 3.1.	66

Índex de figures

2.1	Antonov An-225 transportant el Buran a l'espectacle aeri de Paris. 17 de juny de 1989. Extret de [6]	6
3.1	Plànol de 3 vistes amb seccions de l'Antonov An-225. Plànol obtingut de [7]	19
3.2	Plànol de la bodega. Extret de [3].	20
3.3	Estructura semi-monocasc	21
3.4	Vista isomètrica del contorn inicial de la secció 6.	22
3.5	Mesures de l'alçada i amplada màximes del fuselatge de les seccions on hi ha un marc estructural.	23
3.6	Cabina per a la tripulació. Extret de [8]	24
3.7	Plànols indicant les sortides d'emergència del compartiment de passatgers. Imatge obtinguda de [8].	24
3.8	Marc estructural de la secció 80 de l'Antonov An-225.	25
3.9	Marcs estructurals amb espai per al tren d'aterratge.	27
3.10	Plànols del tren d'aterratge.	27
3.11	Fixacions per a transportar càrregues exteriors. Extret de [9].	28

3.12 Estructura del fuselatge de l'Antonov An-225 modelat utilitzant <i>SolidWorks</i>	28
3.13 Morro de l'An-225 amb la comporta aixecada. Extret de [6]	29
3.14 Comporta de l'Antonov An-225 modelada amb <i>SolidWorks</i>	30
3.15 Perfil aeronàutic seleccionat per a l'estabilitzador del model a escala.	31
3.16 Plànol de detall de l'estabilitzador horitzontal amb les mesures respectives.	32
3.17 Estabilitzador horitzontal	33
3.18 Orientació de les costelles	34
3.19 Forats per alleugerir el pes de la cua	35
3.20 Estructura de l'estabilitzador vertical de l'An-225.	35
3.21 Costella de l'estabilitzador vertical de l'An-225.	36
3.22 Model de l'estabilitzador de l'Antonov An-225 mitjançant <i>SolidWorks</i>	36
3.23 Estructura de la caixa d'ala de l'An-225. Imatge de [10]	37
3.24 Llarguers de l'ala de l'An-225.	38
3.25 Posició de les costelles de l'Airbus A320. Imatge extreta de [11].	39
3.26 Model a escala de la costella 6 de l'Antonov An-225. Modelat amb <i>SolidWorks</i>	40
3.27 Vista isomètrica de detall de la unió entre ala i fuselatge.	42
3.28 Vista frontal del model.	43
3.29 Vista isomètrica del model.	44

ÍNDEX DE FIGURES

3.30 Vista lateral del model.	45
4.1 Plànols per al tall làser de les peces fets amb <i>AutoCad</i>	50
5.1 Taulers de fusta de balsa amb les costelles de l'ala i l'estabilitzador.	52
5.2 Muntatge de les costelles de la caixa d'ala.	53
5.3 Caixa d'ala de la maqueta	54
5.4 Muntatge de l'ala la des de la caixa fins a la punta.	55
5.5 Muntatge de l'estabilitzador vertical.	55
5.6 Muntatge complet dels dos components de l'estabilitzador.	56
5.7 Muntatge dels marcs estructurals del fuselatge.	57
5.8 Muntatge de la caixa d'ala al fuselatge.	58
5.9 Fuselatge complet incloent la caixa d'ala.	58
5.10 Comporta del model a escala muntada.	59
5.11 Estabilitzador del model a escala d'Antonov An-225.	60
5.12 Unió de l'ala a la caixa d'ala.	60
5.13 Model a escala de l'Antonov An-225.	61
5.14 Vista lateral del model a escala.	61
5.15 Vista frontal del model a escala.	62
5.16 Vista davantera del model a escala.	62
5.17 Vista superior del model a escala.	63

1. Introducció

1.1 Objecte

Analitzar l'estructura de l'Antonov An-225, recrear-ne un model en tres dimensions a escala 1:50 utilitzant un programa de disseny gràfic per extreure'n plànols en dues dimensions i realitzar una maqueta de l'aeronau a la mateixa escala.

1.2 Abast

Recopilació de plànols i informació:

- Estudi de plànols adequats per a poder prendre les mesures pertinents de l'estructura de l'Antonov An-225.
- Estudi de l'aeronau, la seva història i funció.

Materials i mètode de tall:

- Estudi i selecció dels materials més adequats per a la construcció de la maqueta en funció del mètode de tall, així com els esforços que haurà d'aguantar el producte final i el preu de la matèria prima.
- Selecció del mètode de tall per a obtenir les peces que conformen la maqueta.

Model virtual en tres dimensions:

- Reproducció de l'estructura del fuselatge de l'Antonov An-225 utilitzant *SolidWorks*.
- Reproducció de l'estructura interna de l'ala i l'estabilitzador de l'Antonov An-225 utilitzant *SolidWorks*.
- Disseny del mètode d'unió entre les peces que formen els diferents components de la maqueta, unió fuselatge-ala i fuselatge-estabilitzador reduint al màxim l'us d'adhesius.

Plànols:

- Creació de plànols en dues dimensions a partir del model tridimensional de l'aeronau.
- Numeració de peces i components de la maqueta per a facilitar la seva identificació durant el muntatge del model a escala.

Tall de les peces i muntatge de la maqueta:

- Tall de les peces a partir dels plànols utilitzant el mètode seleccionat.
- Muntatge de la maqueta.

1.3 Requeriments

Aquesta secció conté els requeriments i consideracions que s'han de tenir en compte durant el disseny i el muntatge de la maqueta de l'Antonov An-225. Hi ha dos requeriments principals:

- La maqueta ha de ser a escala 1:50.
- La maqueta ha d'estar basada en un estudi de l'estructura de l'Antonov An-225.

1.4 Justificació

L'Antonov An-225 és considera l'avio operatiu més gran del món. Un estudi estructural d'aquesta aeronau aprofundeix en els coneixements de disseny d'aeronaus, al mateix temps que desvela les solucions de disseny úniques que van permetre construir un avió com el *Mriya*.

A més es vol entrar en el món del disseny de models a escala, i adaptar el disseny d'avions i les seves estructures a la construcció d'una maqueta, dissenyant sistemes d'unió entre les peces i aplicant-hi solucions modernes, com pot ser el tall làser de les peces.

L'estudi, doncs, apareix amb la intenció de fonamentar coneixements així com d'incorporar-ne de nous, al mateix temps que s'investiga una aeronau tan excepcional com l'Antonov An-225.

2. L'Antonov An-225

2.1 Història

Mriya o Мрія en ucraïnès és el sobrenom d'aquesta famosa aeronau dissenyada als anys 80 per l' *Antonov Design Bureau*, la principal empresa responsable del disseny d'avions militars de càrrega i transport a la Unió Soviètica durant l'època. *Mriya* es podria traduir al català com a somni o inspiració, un mot molt recurrent durant la cursa espacial soviètica fent referència a un dels grans somnis de la humanitat: l'exploració espacial. Això es deu a que la principal tasca per a la que va ser dissenyat l'An-225 va ser el transport del Buran (Буран), el transbordador espacial soviètic i el coet Energia (Энергия) des del seu indret de fabricació a Moscou fins al cosmòdrom de Baikonur, situat a l'estepa desèrtica de Kazakhstan.



Figura 2.1: Antonov An-225 transportant el Buran a l'espectacle aeri de Paris. 17 de juny de 1989. Extret de [6]

El projecte es va desenvolupar ja que segons els càlculs era més econòmic el desenvolupament d'una aeronau de grans dimensions capaç de transportar aquestes càrregues que la creació d'una ruta per terra a través de les muntanyes dels Urals fins a l'indret de llançament. Tot i això, el *Mriya* no va acabar desenvolupant aquesta funció, ja que degut a la caiguda de la URSS poc després del primer vol de l'aeronau el 21 de desembre de 1988, el projecte espacial soviètic es va veure cancel·lat. Això va causar que al 1994 l'aeronau fos parcialment abandonada i els seus motors desmuntats i reutilitzats en un altre model d'Antonov, l'An-124 Ruslan, model a partir del que es va desenvolupar originalment l'An-225.

Al principi dels anys 2000 però, es va fer palesa la utilitat d'una aeronau capaç de transportar càrregues tan pesants per aire com les que podia dur el *Mriya* i se li van tornar a instal·lar els sis *turbofans*, es van modernitzar els sistemes de ràdio i navegació i es va millorar el confort per a la tripulació, possibilitant que el 23 de maig de 2001 rebés el certificat de tipus per part del IAC (*Interstae Aviation Committee*) que va permetre la seva posada en funcionament una altra vegada operant per a *Antonov Airlines*, una companyia ucraïnesa de càrrega.

2.2 L'Antonov An-225 en l'actualitat

La capacitat de càrrega útil de 250 tones, una xifra responsable d'un dels 242 rècords mundials aconseguits per l'aeronau i de l'eslògan d'*Antonov Airlines* “*No other name carries more weight*”, cap altre nom té/porta més pes, fan de l'An-225 un vehicle únic per al transport de càrregues pesants. Durant les dues últimes dècades l'aeronau s'ha utilitzat per al transport de mercaderies per a una gran diversitat d'indústries:

- **Aeroespacial:** la necessitat per a la que va ser originalment dissenyat l'An-225 segueix vigent, i el transport de satèl·lits i propulsors de coet a plataformes de llançament remotes és una de les tasques que compleix l'aeronau. Gràcies a la mida de la seva bodega també té la capacitat de transportar fuselatges d'altres aeronaus al seu interior, així com helicòpters que requereixen ser entregats lluny del seu punt de fabricació.
- **Combustibles fòssils:** el transport de dipòsits i equipament de grans dimensions per a l'explotació de petroli i gas també ha estat revolucionat per la disponibilitat de l'Antonov An-225, i peces que abans requerien mesos de transport per terra o mar es poden entregar en qüestió de dies.
- **Energia:** dels rècords assolits per l'An-225 un dels més destacables està relacionat amb el transport de generadors; al 2009 va batre el rècord de càrrega d'una sola peça al dur un generador de 187.6 tones des de l'aeroport de Frankfurt fins a Armènia. Pertanyent a aquesta mateixa indústria també es va batre el rècord de transport de la càrrega més llarga al dur dues aspes de 42.1 metres per a aerogeneradors des de Xina fins a Dinamarca.
- **Automòbil:** gràcies a la comporta davantera, la rampa i la capacitat del tren d'aterratge davanter de rebaixar la seva altura per a acostar la secció davantera al terra es facilita la càrrega de l'aeronau, que es pot dur a terme directament fent ús de camions tràiler al seu interior. La seva disposició permet el transport de 50 vehicles al seu interior.
- **Intermodal:** de la mateixa manera que s'exposa al punt anterior l'An-225 es pot carregar amb 16 contenidors estàndard per a aconseguir un transport molt més ràpid que el transport per mar tradicional.

-
- **Marítima:** des de la seva posada en marxa l'Antonov An-225 ha estat utilitzat per al transport de vaixells arreu del món, sobretot vaixells de competició com els de la Copa de les Amèriques, que necessiten un transport ràpid i eficaç des del punt de fabricació fins a l'indret on es desenvolupa la competició.
 - **Ferrocarril:** aprofitant els 43.3 metres de longitud de la bodega de l'aeronau, el transport de trens és una de les tasques que pot desenvolupar l'An-225.
 - **Missions humanitàries:** l'Antonov An-225 té una gran història oferint ajuda humanitària durant diferents catàstrofes. Durant els greus terratrèmols d'Haití de 2010 i el tsunami a Japó de 2011 ja va tenir un rol destacat proveint recursos i ajut a ambdós països. Encara és més destacable la recent tasca durant la pandèmia mundial causada per el COVID-19 en la que l'aeronau i la seva tripulació han contribuït carregant des de Xina a diversos punts d'Europa unes 100 tones i 1000 metres cúbics per vol de medicaments, components necessaris per a dur a terme proves de laboratori, màscares i altres equips de protecció de vital importància per al serveis mèdics encarregats de controlar la pandèmia.

2.3 El futur del *Mriya*

La caiguda de la Unió Soviètica al 1991 va donar un final precipitat a la producció del *Mriya* causant que només se'n completés una unitat, la mateixa que es manté operativa avui en dia, i que un segon fuselatge a mig fabricar quedés emmagatzemat a un hangar d'Ucraïna. Tot i això, l'evolució de la indústria aeronàutica sembla tenir nous plans per a l'Antonov An-225 ja que a 2016 la AVIC (*Aviation Industry Corporation of China*) va arribar a un principi d'acord amb Antonov que dona l'accés al disseny i tecnologies que incorpora el *Mriya* amb la intenció de completar la fabricació del segon fuselatge i de reprendre la producció de noves unitats de l'aeronau a la Xina en el futur.

El retorn de la producció de l'An-225 es veu motivat per un propòsit molt semblant per al qual va ser dissenyat als anys 80: l'assoliment del programa espacial Xinès. La funció projectada per al *Mriya* és la de plataforma per a llançaments a òrbita des de l'aire, una tècnica empleada a petita escala

2. L'Antonov An-225

que va guanyar importància durant la Guerra Freda però que segueix vigent avui en dia. Aquesta tècnica consisteix en fer ús d'una aeronau per a dur la càrrega que es vol posar en òrbita, ja sigui un satèl·lit o un coet, a altura per efectuar el llançament; això comporta avantatges importants ja que el llançament ja disposa de la velocitat inicial que porta l'avió i parteix des de gran altura aprofitant també una menor densitat de l'atmosfera, possibilitant la reducció de la massa i de combustible necessari per a dur a terme la maniobra. El principal desavantatge que comporta aquesta tècnica és que els avions convencionals no tenen ni la mida ni la configuració necessària per a poder desenvolupar aquesta tasca; d'altra banda l'Antonov An-225 ja va ser dissenyat amb una intenció similar, el que permet utilitzar aquesta tècnica eficientment.

Tot i aquest prometedor futur, el conflicte entre Ucraïna i Rússia per la península de Crimea va aturar la finalització de la segona unitat de An-225 i el projecte encara segueix en espera. No obstant, la recent crisi humanitària causada per el COVID-19 ha demostrat la utilitat de l'existència d'un avió de càrrega com el *Mriya*, i tot i tenir un mercat molt limitat hi ha funcions per a les quals té un gran avantatge.

2.4 Especificacions

L'Antonov An-225 es va dissenyar amb la finalitat de transportar càrregues excepcionals pel que es refereix al pes i dimensions, això fa que l'aeronau tingui unes característiques úniques dins el món de l'aviació.

El seu disseny està basat en un altre model més petit del mateix fabricant: l'Antonov AN-124. A causa d'això comparteix característiques amb el seu predecessor i fins i tot molts dels components de l'estructura i el fuselatge són exactament els mateixos per a ambdós models. Els extrems de les ales són compartits, però la caixa d'ala rep modificacions per al *Mriya* amb l'objectiu d'incrementar la seva envergadura fins als 88.4 metres. El fuselatge també es veu modificat per tal d'augmentar la mida de la bodega, dotant l'avió de 84 metres de longitud. Aquestes modificacions permeten a l'An-225 portar un volum més gran de càrrega, però també comporten un augment del MTOW (el pes màxim d'enlairament de l'avió) el que requereix més empenta per part dels motors i també la instal·lació d'un tren d'aterratge capaç d'aguantar les 640 tones de MTOW. És per aquest motiu que incorpora una configuració

poc convencional de *turbofans*, fent us de tres *Progress D-18T* per semi-ala que desenvolupen 229 kN per unitat; fabricades durant els anys 70 a la Unió Soviètica eren plantes motrius originalment dissenyades per a l'An-124, el qual n'emprava 4 en total. Pel que fa al tren d'aterratge s'aprofita el fuselatge reforçat i la substitució de la comporta de càrrega posterior per una sola rampa davantera per utilitzar un sistema format per 32 rodes, 4 de les quals davanteres i amb la capacitat de fer baixar el fuselatge fins a la plataforma per facilitar les operacions de càrrega i descàrrega. La característica més notable a simple vista del *Mriya* és el seu doble estabilitzador horitzontal amb forma d' "H" que el diferencia de l'estabilitzador convencional del *Ruslan*. Aquesta solució de disseny es deu a la necessitat del *Mriya* de dur càrregues de grans dimensions al seu exterior, com ara el transbordador espacial soviètic. Una càrrega exterior d'aquestes dimensions damunt els ancoratges situats damunt el fuselatge provoca pertorbacions en el flux d'aire exterior, el que afecta a la capa límit i el flux d'aire que rebria un estabilitzador convencional situat immediatament darrere del volum que es transporta. Al sobredimensionar l'estabilitzador i situar les dues superfícies verticals als laterals fa que aquestes segueixin rebent un flux d'aire sense tantes pertorbacions i garanteix el control segur de l'aeronau.

A continuació s'exposa una taula amb les principals especificacions de l'Antonov An-225 *Mriya*:

Característiques generals	
Llargada	84 m
Envergadura	88.4 m
Alçada	18.1 m
Àrea d'ala	905 m ²
Pes buit	285.000 kg
MTOW	640.000 kg
Càrrega màxima	250.000 kg
Volum de bodega	1.200 m ³
Propulsió	6 x Progress D-18T <i>turbofans</i> , 229.5 kN cada un

Taula 2.1: Especificacions de l'Antonov An-225. Dades extretes de [1] [2] [3]

Pel que fa al rendiment de l'aeronau, la seva capacitat per dur càrregues tan pesants l'ha fet batre més d'un rècord al món de l'aviació, però comporta que perdi la capacitat de realitzar maniobres d'enlairament i aterratge relativament curtes com les que pot dur a terme l'An-124. El *Mriya* està pensat per

2. L'Antonov An-225

a realitzar vols llargs de forma ràpida, però per això necessita pistes adequades per a la seva operació, ja que degut a la seva mida necessita una amplada de pista de 60 metres i una longitud de 3.500 metres, superior a la majoria de les que requereixen la majoria d'avions que hi ha en operació.

Rendiment	
Velocitat màxima	850 km/h
Velocitat de creuer	800 km/h
Abast	15.400 km amb màxima càrrega de combustible
	4.000 km amb 200 tones de <i>payload</i>
Sostre	11.000 metres
Càrrega alar	$662.9 \frac{kg}{m^2}$
Ràtio impuls-pes	0.234

Taula 2.2: Rendiment de l'Antonov An-225. Dades extretes de [1] [2] [3]

3. Disseny del model a escala

3.1 Mètode de tall

Abans de començar amb el procés de disseny és indispensable la selecció del mètode de tall per tal d'establir les limitacions que aquest pot suposar durant el procés de disseny, així com la tria dels materials.

Un dels objectius del projecte és aconseguir reduir l'ús de cola i altres mètodes d'unió similars per tal de substituir-los per encaixos i mecanismes d'unió entre les pròpies peces del model. Per tal d'assolir-ho es requereix una gran precisió en el tall de les peces i la tecnologia que pot oferir una elevada precisió a un preu assequible és el tall làser. Aquest mètode CNC (control numèric per computadora) utilitza arxius amb traçat de format vectorial *.dwg* que es poden obtenir directament a partir de plànols de *SolidWorks* per dirigir un raig làser capaç de cremar el material seleccionat amb precisió i obtenint un acabat de molt bona qualitat. A més aquest mètode s'ha popularitzat els últims anys per a la realització de models a escala degut a que cada cop és més accessible i té un preu més reduït. Per tant es decideix fer ús del tall làser, ja que no hi ha cap altre mètode que pugui hi pugui competir per a completar aquest estudi.

S'ha de tenir en compte però que la utilització del tall làser per obtenir les peces de la maqueta afegeix uns nous requeriments a l'hora de dissenyar les peces. Aquests requeriments s'exposen a la següent secció.

3.1.1 Requeriments del tall làser

A continuació s'exposen els requeriments que imposa la selecció del tall làser com a mètode de tall:

- **Escala:** tots els plànols utilitzats per al tall làser han d'estar a escala 1:1 en mil·límetres de manera que una unitat equival a un mil·límetre.
- **Arxiu:** els plànols han d'estar en format vectorial *.dwg*.
- **Capes i colors:** cada tipus de tall ha de tenir un color assignat per tal de que es pugui diferenciar dels altres durant el procés de tall. S'han de separar el tall exterior, talls interiors i gravats damunt el material. També és necessari incloure als plànols una capa de color limitant la plataforma de la màquina de tall làser així com una delimitació del material amb un *offset* de 8 mil·límetres cap a l'interior on hi han de cabre les peces sense creuar-la.
- **Distàncies:** totes les línies de tall d'una mateixa peça han d'estar separades per com a mínim una distància de 1.2 mil·límetres per assegurar que no es produeixin trencs.

3.2 Materials

Al fer ús de tall làser el material seleccionat també ha de ser apte per la tecnologia amb la finalitat d'assegurar un tall net i sense trencs de les peces. La lleugeresa i resistència del material són dues de les característiques més importants a tenir en compte durant aquest procés de selecció. Per a la realització de maquetes s'ofereixen una selecció de làmines de fusta i cartó; degut a que el model representa l'estructura d'una aeronau i com que la majoria de peces estaran sotmeses a petits esforços per tal de subjectar-ne d'altres, es decideix fer ús de làmines de fusta ja que són bastant més resistents que el cartró i els seus derivats. A continuació s'exposa una taula amb tots els tipus de làmines de fusta disponibles per al tall làser i les seves mides i preu.

3. Disseny del model a escala

Material	Superfície [mm]	Gruix [mm]	Preu [€]
Fusta de balsa	1000 x 100	2	2.75
Contraplacat de pollancre	1200 x 600	3	8.75
Tauler DM-MDF	1220 x 1220	2.5	7.80
Contraplacat de bedoll	500 x 250	2-3	11.40-11.80

Taula 3.1: Làmines de fusta disponibles per al tall làser, marcades de color groc aquelles que s'han escollit per a la construcció del model a escala. Dades extretes del catàleg [4].

Material	Densitat [kg/m^3]
Fusta de balsa	100-200
Tauler de DM-MDF	450-600
Contraplacat de pollancre	430
Contraplacat de bedoll	650

Taula 3.2: Densitats dels diferents materials. Dades extretes del catàleg [5]

Dels materials de la taula, la fusta de balsa és la que té més tradició d'ús al modelisme i sobretot aeromodelisme degut a la seva gran lleugeresa que li proporciona una densitat molt baixa que pot variar entre 100 i 200 kg/m^3 , en funció de la humitat que contingui el material, i el fet que és un tipus de fusta molt fàcil de manipular amb tot tipus d'eines, donant-li una gran versatilitat. Tot i això, aquesta lleugeresa comporta un pitjor rendiment en quant a les propietats mecàniques. Comparant-la amb el tauler de DM de 2.5 mm que presenta una resistència a la flexió de 38 N/mm^2 la balsa només mostra una resistència d'entre 18 i 22 N/mm^2 en funció del catàleg de materials que es consulti. D'aquest fet se'n pot extreure que la balsa és un gran material per a construir models a escala, però s'ha d'evitar per a peces o seccions del model que hagin d'aguantar esforços importants per suportar altres seccions de la maqueta.

Aprofitant el gran avantatge que proporciona una densitat tan baixa per reduir el pes del model es pren la decisió de que totes aquelles peces que no es vegin subjectes a esforços es faran a partir de fusta de balsa. Això inclou principalment les costelles de l'ala i l'estabilitzador tan vertical com horitzontal, ja que són components que han de ser subjectats pels llarguers de l'estructura i és important reduir la càrrega que aquests han d'aguantar ja que es tracta de peces llargues subjectades al fuselatge que es veurien

sotmeses a un esforç de flexió important causat pel pes de les costelles.

L'ús de la fusta de balsa presenta una limitació pel que fa a la mida dels taulers disponibles, ja que l'ample màxim és de 100 mm i peces com els marcs del fuselatge principal de l'Antonov An-225 a escala 1:50 van des dels 140 fins als 190 mil·límetres fent impossible el tall d'aquestes parts d'una sola peça de fusta de balsa. A causa d'això s'ha de seleccionar un dels altres tres materials com a alternativa per als elements amb mides superiors a 100 mm.

De les 3 opcions que resten de material, el contraplacat de bedoll queda descartat directament degut al seu elevat preu. Si es compara amb el tauler de DM per exemple, per obtenir la mateixa superfície de material el preu total seria aproximadament 138 €, és a dir, pel preu d'una superfície de contraplacat de bedoll de 1200x1200 mil·límetres es podrien obtenir gairebé 18 taulers de DM.

Per tant s'ha de triar entre el contraplacat de pollancre i el tauler de DM per a aquelles peces que siguin massa grans per a fer ús de la fusta de balsa o hagin d'aguantar un esforç que podria causar que la fusta de balsa es trenqués. Pel que fa al preu el contraplacat de pollancre és el doble de car comparant-lo directament amb el tauler de DM i pel que fa a la densitat i per tant el pes de les peces el DM és lleugerament més pesat en funció de la composició, però degut a que el pollancre té 0.5 mil·límetres més de gruix les peces tindrien el mateix pes fent ús de qualsevol dels dos materials. Pel que fa a l'acabat després del tall làser el DM té un comportament més bo que el pollancre, ja que es tracta de fibres premsades mentre que el contraplacat al tallar-se pot mostrar imperfeccions. Tenint en compte aquest fet i que el DM és la opció més barata es decideix fer ús de taulers de DM-MDF per a aquelles peces que per les raons exposades amb anterioritat no puguin fer-se mitjançant fusta de balsa. Per tant la tria final de material queda indicada utilitzant color groc a la taula 3.1.

3.3 Disseny del model amb *SolidWorks*

El primer pas per a la realització del model a escala 1:50 de l'estructura de l'Antonov An-225 és dur a terme un model en tres dimensions fent ús d'un software de CAD (disseny assistit per computadora) amb la finalitat de poder-ne extreure plànols en dues dimensions per a un posterior tall de les

3. Disseny del model a escala

peces que formaran la maqueta final. Per a aquesta tasca s'ha elegit el software *SolidWorks* de *Dassault Systemes* aprofitant els coneixements obtinguts sobre aquest software durant el grau en enginyeria de vehicles aeroespacials.

Durant tot el procés de disseny s'utilitza la funció de variables globals que ofereix *SolidWorks* per al gruix i els encaixos de les peces. D'aquesta manera si hi hagués algun imprevist pel que fa als materials o es volgués fer un canvi només faria falta modificar els valors corresponents a les equacions corresponents i tot el model s'adaptaria al nou gruix seleccionat.

Els plànols al complet del model escala i de les peces més representatives de les que s'explica el disseny a continuació es poden consultar al document adjunt de *Plànols*.

3.3.1 Recopilació d'informació

Per a fer una rèplica fidel a l'estructura de l'Antonov An-225 és de gran importància tenir la documentació, ja sigui per mitjà de plànols o imatges, més detallada possible. Aquest punt és crític ja que en funció dels plànols de l'aeronau dels quals es tingui disponibilitat la tasca es pot fer molt més eficient i el resultat final del model serà el més pròxim a la realitat.

En el cas de l'An-225 la disponibilitat de plànols és molt limitada ja que és un avió del qual només se'n va fabricar una sola unitat i que ja no es fabrica des de fa 40 anys; no hi ha cap document que mostri l'estructura de l'aeronau amb detall ni una secció parcial del mateix. A més, degut a que encara roman operacional i a l'interès recent que ha presentat Xina pel disseny de l'aeronau, els plànols d'aquesta no són d'ús públic. Es va entrar en contacte amb l'aerolínia que manté operacional el *Mriya*, *Antonov Airlines*, per tal d'obtenir informació addicional de l'avió o recursos gràfics per a utilitzar durant la realització del model però la resposta per part de l'empresa va ser desfavorable.

Per aquests motius els principals documents amb els quals s'ha treballat durant la fase de disseny han estat limitats i una gran part s'ha hagut de completar utilitzant fotografies tant exteriors com interiors de l'aeronau. Per a aquells components o mesures dels quals no s'ha pogut disposar de la informació desitjada sobre l'An-225 s'ha hagut de recórrer a documentació referent a aeronaus similars com l'Antonov An-124 o el Boeing 747. D'entre

les fotografies, les de més importància han estat les del segon fuselatge d'An-225 inacabat, ja que mostra l'estructura sense recobriment, el que permet veure solucions de disseny que sinó estarien tapades. Tant aquests casos com el disseny de peces i seccions del model la informació detallada s'exposa a la següent secció en la que s'explica en profunditat el procés de disseny. Per a la presa general de mides i per a consultar la forma de les diferents seccions del fuselatge s'han utilitzat principalment dos documents que es mostren a continuació.

3. Disseny del model a escala

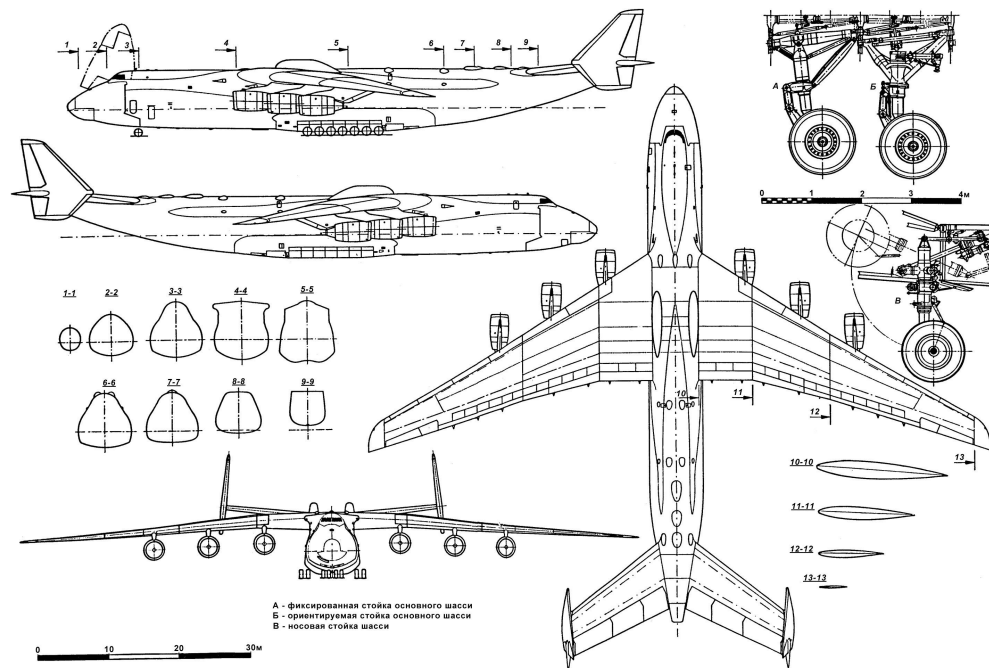


Figura 3.1: Plànol de 3 vistes amb seccions de l'Antonov An-225. Plànol obtingut de [7]

Aquest plànol de l'Antonov An-225 és el més detallat del que s'ha pogut disposar durant el procés de disseny. Presenta l'aeronau vista des de les tres vistes clàssiques però el gran avantatge que aporta són seccions tant de la forma de fuselatge al llarg del mateix com de la forma del perfil aerodinàmic al llarg de l'ala. També incorpora, utilitzant línia d'eix, la localització dels llarguers tant de l'ala com de l'estabilitzador horitzontal.

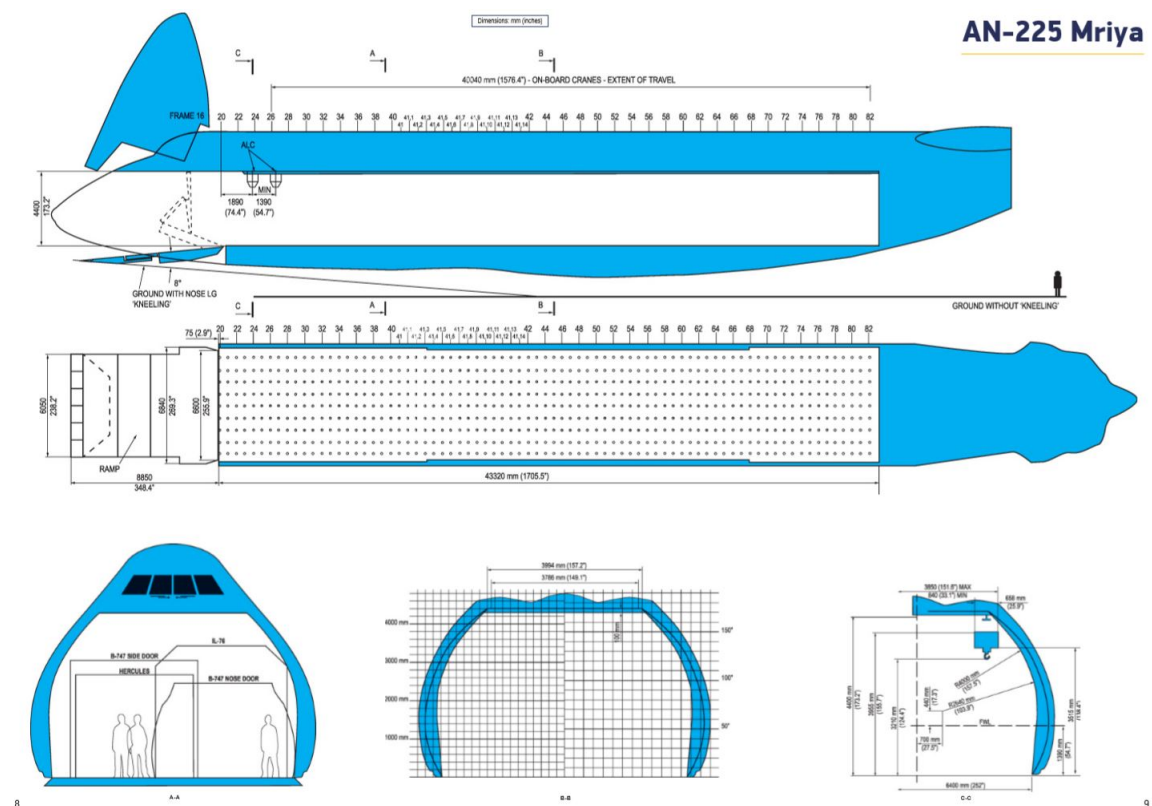


Figura 3.2: Plànol de la bodega. Extret de [3].

És el segon plànol utilitzat durant el procés de disseny per a obtenir informació més detallada de l'interior de la bodega del *Mriya* i de la seva distribució. Extret del butlletí oficial de l'aerolínia, mostra la distància entre els ancoratges de la grua que es troba al sostre de la bodega per tal de distribuir la càrrega així com la mida de l'obertura de la comporta. La numeració utilitzada durant el procés de disseny dels marcs estructurals del fuselatge segueix la numeració establerta per aquest document.

3.3.2 Disseny del fuselatge

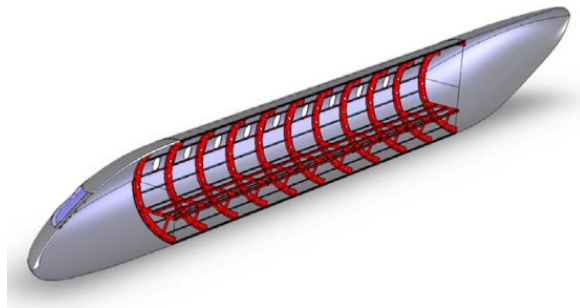
El primer pas per a realitzar el disseny de l'estructura del fuselatge de l'aeronau és identificar el tipus d'estructura de la que fa ús. En el cas de l'Antonov An-225 incorpora una estructura de semi-monocasc. Aquest tipus de estructura és una evolució del monocasc clàssic en la que una membrana,

3. Disseny del model a escala

en aquest cas el recobriment de la cabina, aguanta els esforços i fa la funció d'estructura. Aquest disseny és molt útil per a aeronaus degut a la seva rigidesa enfront la flexió i la seva lleugeresa però presenta un greu problema quan s'enfronta a esforços de vinclament presentant una clara inestabilitat estructural [12]. És per aquest motiu que les aeronaus modernes de les característiques del *Mriya* utilitzen el semi-monocasc, que incorpora una sèrie de marcs i llarguers estructurals que permeten aguantar càrregues i esforços molt més grans.



(a) Estructura visible de semi-monocasc del fuselatge de l'An-225. Extret de [10]



(b) Representació d'una estructura semi-monocasc, en vermell indicats els marcs i llarguers estructurals i en gris la membrana exterior. Extret de [12]

Figura 3.3: Estructura semi-monocasc

Com es pot veure a la figura 3.3 l'An-225 té un seguit de marcs estructurals cada poca distància acompanyats d'una gran quantitat de llarguers al seu voltant per tal d'assegurar l'estabilitat estructural. Són aquests marcs els que donen la forma al fuselatge i per tant són la part més representativa de la forma de l'estructura de l'Antonov An-225. Per tal de modelar-los es requereix saber tant la seva forma com la separació; aquesta informació la proporcionen les figures 3.2 i 3.1. A la primera estan indicats els marcs per tal de numerar els que disposen d'una fixació pel recorregut interior de la grua i per tant estan capacitats per aguantar el pes de la càrrega. Es pot apreciar que apareixen els marcs parells des del 20 fins al 82 amb una secció al mig on la distància entre marcs es redueix. Fent ús de les mesures de la bodega que apareixen a la mateixa figura i mitjançant un càlcul ràpid s'obté la separació, que resulta ser de 0.57 metres, i per tant la separació entre els punts de recorregut de la grua és del doble, de 1.14 metres. Fent ús de l'escala 1:50 a

la que es realitza el model les distàncies queden de la següent manera: 11.44 mm entre marcs i 22.88 entre les fixacions. La primera separació comporta que per a fer el model s'hauria de situar una peça per a cada marc estructural cada poc més d'un centímetre i hi hauria d'haver 82 peces només per a la secció de la bodega; clarament això faria que el pes del model a escala un cop construït fos molt gran i podria donar complicacions durant aquesta fase, a més amb separacions tant petites no s'arribarien a veure correctament totes les peces o altre components estructurals de la maqueta, que quedarien tapats a l'interior. És per aquest motiu que es pren la decisió de fer que la separació entre els marcs estructurals sigui la segona de 22.88 mil·límetres, i per tant només incorporar aquells marcs estructurals al model que tinguin un ancoratge de la grua interior de la bodega que porten la numeració parell al catàleg d'*Antonov Airlines* [3].

Distància entre marcs estructurals a escala	22.88 mm
---	----------

Pel que fa a la forma d'aquests components de l'estructura a la figura 3.1 mostra el contorn de les 9 seccions més característiques de l'aeronau al llarg del fuselatge, de forma que utilitzant el plànol com a "canvas" a escala de *SolidWorks* es pot dibuixar damunt les diferents seccions per després extruir-les al gruix desitjat i aconseguir recrear les peces que formaran els marcs del fuselatge.

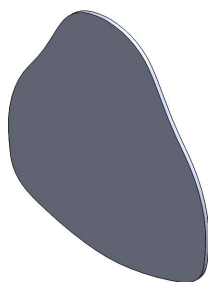


Figura 3.4: Vista isomètrica del contorn inicial de la secció 6.

Les seccions situades entre aquests talls numerats de 1 a 9 no apareixen al plànol de 3 vistes, de forma que la manera per modelar-les és mesurar a la vista lateral i a la planta l'alçada i amplada màxima del fuselatge cada 22.88 mil·límetres i utilitzant fotografies de l'exterior de l'aeronau i les nou seccions conegudes recrear els marcs intermedis.

3. Disseny del model a escala

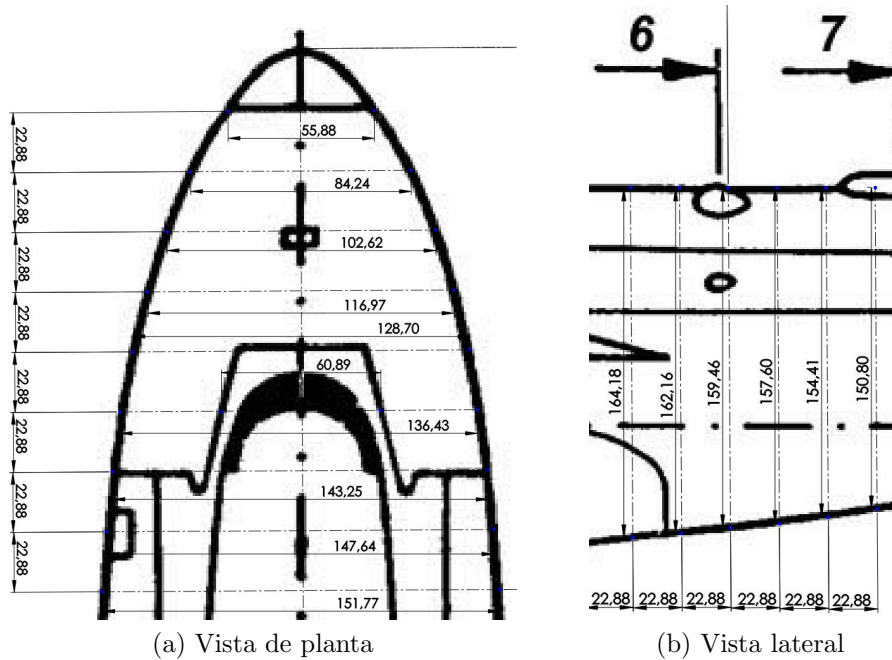


Figura 3.5: Mesures de l'alçada i amplada màximes del fuselatge de les seccions on hi ha un marc estructural.

Per continuar amb el disseny dels marcs estructurals s'estudia la forma interior d'aquests, ja que amb les seccions del plànol de 3 vistes del que es disposa només es té coneixement de la forma exterior. A la figura 3.2 s'aprecia que tant el terra com el sostre de la bodega es mantenen a la mateixa altura durant tot el recorregut interior, i que són paral·lels a la part superior del fuselatge de l'aeronau. A la mateixa figura es pot mesurar fàcilment l'alçada de la bodega, que es manté constant de 4.40 metres, és a dir, 88 mil·límetres a la escala desitjada. Pel que fa a la part superior dels marcs s'ha d'estudiar el compartiment superior a la bodega.



Figura 3.6: Cabina per a la tripulació. Extret de [8]

L'Antonov An-225 té una cabina per a la tripulació a la part superior del fuselatge que s'estén des de l'habitacle de comandament fins a la caixa d'ala per la part davantera, i des del final de la caixa d'ala fins al final de la bodega per la part posterior, on viatja el personal de manteniment i els encarregats de la càrrega que es transporta. Aquesta configuració es pot apreciar amb facilitat als plànols que indiquen les sortides d'emergència.

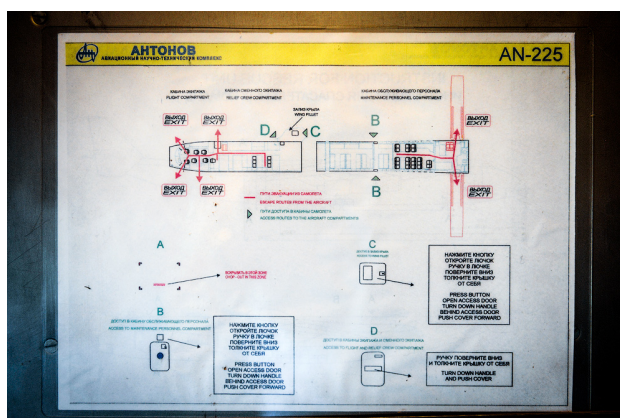


Figura 3.7: Plànols indicant les sortides d'emergència del compartiment de passatgers. Imatge obtinguda de [8].

Per tant s'inclou als marcs estructurals un travesser al sostre de la bodega que fa de separació entre aquesta i la cabina de passatgers en les seccions que correspongui. Aquest travesser té una sèrie de perforacions per a estibar càrrega i per a reduir el pes de l'estructura, tal i com es pot apreciar a la figura

3. Disseny del model a escala

3.3 (a). Aquests forats també es recreen als marcs estructurals del model a escala com es pot apreciar a la següent imatge, on apareix una d'aquestes seccions completada.

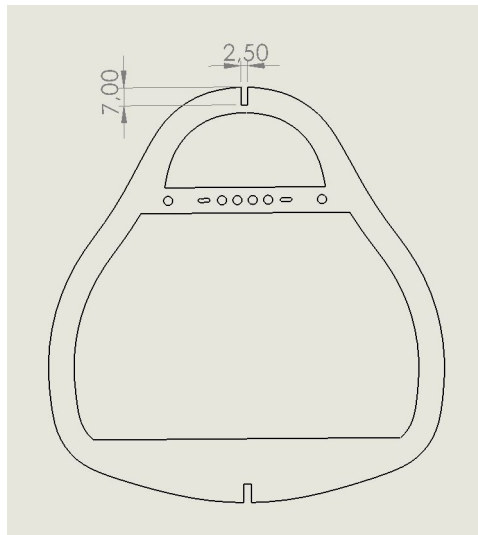


Figura 3.8: Marc estructural de la secció 80 de l'Antonov An-225.

Com es pot veure, tant a l'extrem superior com a l'inferior hi ha dues osques. Aquestes tenen 2.5 mil·límetres d'amplada i serveixen com a encaix per a un llarguer superior i un llarguer inferior que fan la funció d'unir tots els marcs al llarg del fuselatge. L'estructura de l'aeronau real com es pot apreciar a la figura 3.3 (a) té llarguers prims al voltant de tots els marcs per tal d'assegurar la integritat estructural. Tot i això s'ha decidit no recrear aquest fet exactament al model escala, ja que aquests llarguers a escala fan menys de 1 mil·límetre i a més tenen un recorregut corb al llarg del fuselatge de l'aeronau, de manera que no es compleixen els requeriments imposats per el tall làser de les peces. El tall làser només permet obtenir peces planes en dues dimensions pel que aquests llarguers que segueixen les corbes de la forma exterior del fuselatge no es podrien tallar de la forma desitjada. A més incorporar aquesta gran quantitat de llarguers faria incrementar molt el pes del model a escala, el que podria causar que els materials escollits no poguessin tolerar els esforços necessaris. Per aquest motiu es decideix substituir aquest conjunt de llarguers per dos llarguers principals fets amb tauler de DM de 2.5 mil·límetres de gruix que subjecten les peces mitjançant el encaixos que es veuen a la figura; la forma d'aquests dos llarguers principals es modela utilitzant la vista lateral del plànol de tres vistes de la figura 3.1

seguint els contorns inferior i superior del fuselatge.

Pel que fa al gruix d'aquest llarguer és de 7 mil·límetres, la mateixa distància que es pot veure al tall B-B de la figura 3.2 entre el perfil interior i el perfil exterior del marc estructural que s'exposa. Com que ha d'existir un encaix entre aquestes peces, els marcs han de tenir un marge de gruix entre el contorn interior i exterior de les peces per tal de que les osques no provoquin trencs a les seccions. Es decideix deixar un marge de 3 mm recomanat pels professionals d'*Espai Model*, experts en maquetes i tall làser; per tant el gruix d'aquests marcs estructurals acaba sent de 10 mil·límetres.

Hi ha alguns marcs estructurals que tenen diferències considerables que s'han de tenir en compte. A la zona de cua de l'Antonov An-225 hi ha alguna variació en l'estructura ja que com que en el tram final ja no hi ha bodega apareixen mampares estructurals que separen l'espai interior de l'estructura en zones diferents, amb la funció d'augmentar la integritat estructural de l'aeronau, especialment a la zona de l'estabilitzador on tenen efecte forces aerodinàmiques. Aquestes seccions especials s'han tingut en compte per al disseny del model escala, deixant les seccions que corresponen a aquestes mampares sense tall interior. L'altra diferència més important que es troba al llarg del fuselatge és la que causa tant el tren d'aterratge principal com el doble tren davanter. Degut a que com és obvi per un avió de les característiques del *Mriya* el tren és totalment retractil i es fica dins el fuselatge a la zona on hi ha els compartiments per a guardar-lo l'estructura ha de tenir una discontinuïtat per a fer lloc per a les 28 rodes del tren principal. Per al tren davanter succeïx el mateix, així com les dues perforacions que es poden veure a la següent figura (a) on hi ha els ancoratges del doble tren davanter.

3. Disseny del model a escala

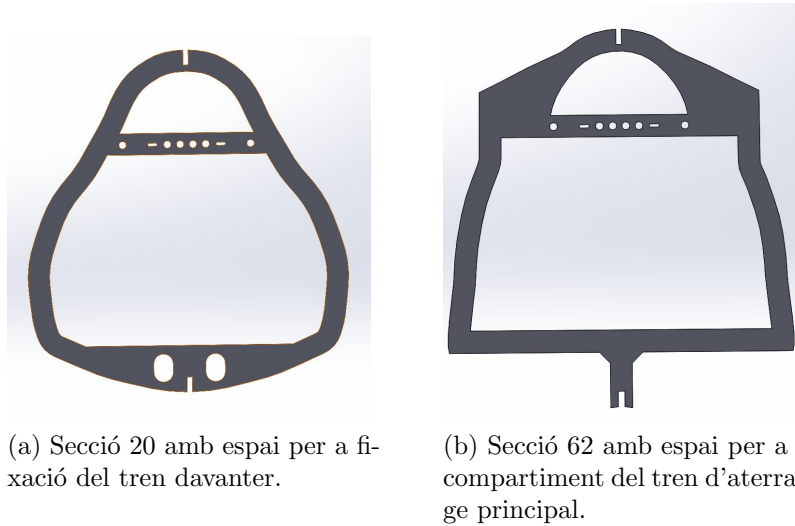


Figura 3.9: Marcs estructurals amb espai per al tren d'aterratge.

Per a calcular la mida del compartiment principal s'han utilitzat els següents plànols, tenint en compte que es plega seguint una trajectòria circular com indica el detall de la figura 3.1.

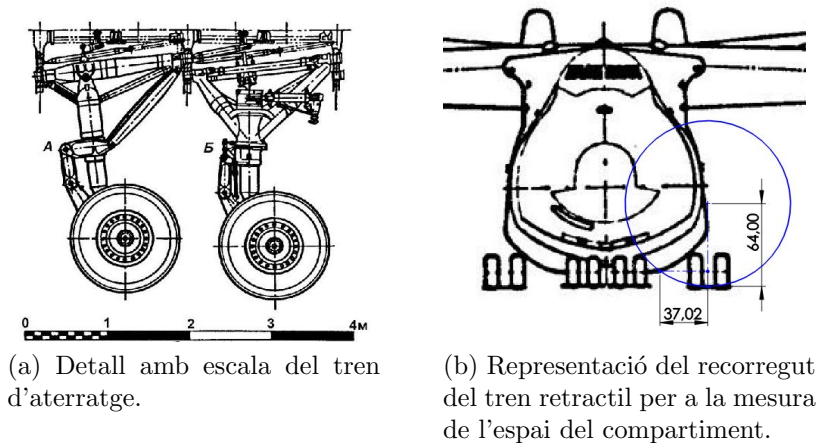


Figura 3.10: Plànols del tren d'aterratge.

El fuselatge del *Mriya* també inclou fixacions al damunt del fuselatge, instal·lades originalment per a poder subjectar la llançadora soviètica.



Figura 3.11: Fixacions per a transportar càrregues exteriors. Extret de [9].

Aquestes dues fixacions es modelen i es creen encaixos a la part superior dels marcs estructurals per tal de poder-les muntar al acoblament del fuselatge.

Amb totes les seccions modelades, així com els llarguers encarregats d'unir l'estructura es pot procedir a realitzar un acoblament de les peces que formen el fuselatge utilitzant la característica que ofereix *SolidWorks* per a fer-ho. S'ha de fer notar que l'extrem davanter de l'aeronau on es troba la comporta s'acobla per separat, ja que l'Antonov An-225 disposa d'una comporta davantera on tot el morro de l'aeronau s'aixeca per a facilitar la càrrega de la bodega.

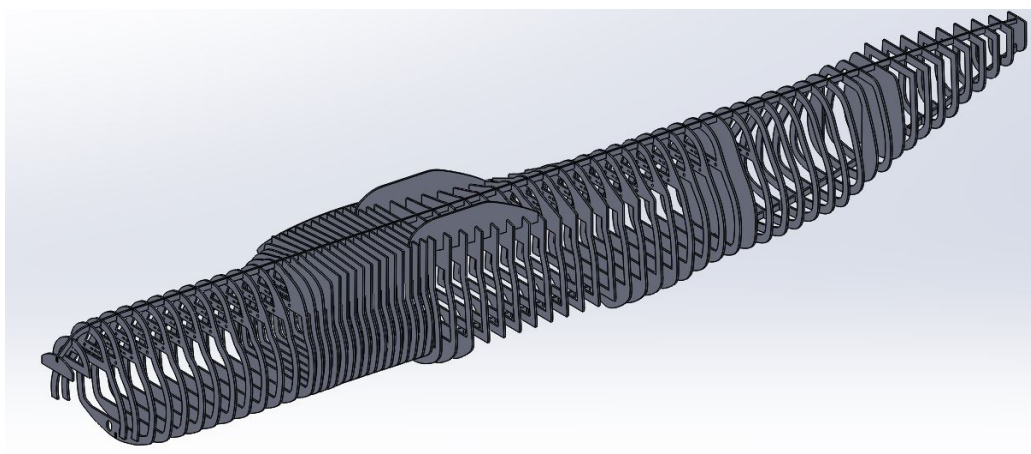


Figura 3.12: Estructura del fuselatge de l'Antonov An-225 modelat utilitzant *SolidWorks*.

3.3.3 Disseny de la comporta

L'Antonov An-225 té una comporta davantera que s'obre per damunt de la cabina de comandament de l'aeronau. Aquesta comporta aixeca tot el morro de l'aeronau a partir del principi de la bodega i permet introduir càrregues tant amples com la bodega en si, el que diferencia el *Mriya* d'altres avions de càrrega com el Boeing 747, amb comportes més reduïdes.



Figura 3.13: Morro de l'An-225 amb la comporta aixecada. Extret de [6]

Degut a aquest fet, i tal com es pot veure a la figura 3.13 el morro de l'An-225 és estructuralment independent de la resta de l'Aeronau excepte per dues unions als laterals amb pistons quan està obert. Per aquest motiu es decideix modelar la comporta com un muntatge independent de la resta del fuselatge. Per al seu disseny es segueix el mateix mètode que per a la resta del fuselatge pel que fa a la separació de les costelles i els llarguers, ja que com es pot apreciar a les imatges, la construcció és gairebé idèntica excepte pels reforços i l'espai a l'estructura per a guardar les dues rodes del tren d'aterratge davanter. Aquest espai es té en compte per al modelatge de la comporta i la zona on es situen les obertures per a guardar les rodes es deixen buides sense cap marc ni llarguer que les travessi; també es modelen els dos contraforts a banda i banda per a reforçar aquesta zona. Finalment les seccions més pròximes a l'extrem davanter presenten un canvi de nivell representat també al model a escala.

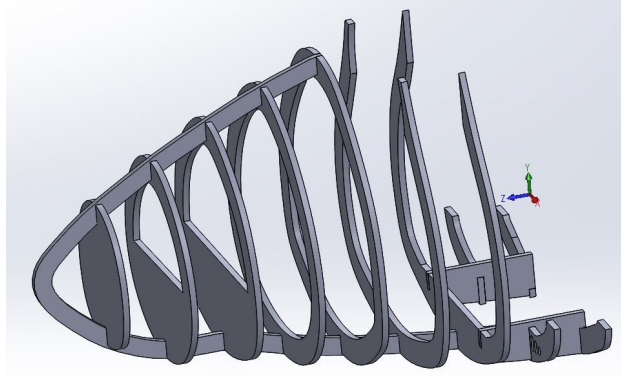


Figura 3.14: Comporta de l'Antonov An-225 modelada amb *SolidWorks*.

3.3.4 Disseny de l'estabilitzador

El doble estabilitzador vertical de l'Antonov An-225 és un dels seus trets més característics i el que més el diferencia de l'An-124, donant-li la capacitat de transportar càrregues excepcionals a sobre del fuselatge. L'estructura de l'estabilitzador és una de les parts que més pot variar d'una aeronau a una altra, ja sigui pel número de llarguers o la seva disposició; el que sí que sol ser una constant com passa en el cas del *Mriya* és que els perfils aerònautics utilitzats tant en les superfícies que formen l'estabilitzador vertical com l'horitzontal són simètrics ja que la seva funció principal es estabilitzar l'aeronau i a més la força neta generada sobre les superfícies varia en funció de l'angle de deflexió del timó de cua i dels elevadors de manera que l'asimetria causaria una desestabilització de l'aeronau. Normalment s'utilitzen perfils amb un gruix situat entre el 8 i el 12 per cent de la corda del perfil aeronàutic, però per al disseny de l'An-225, al tenir una cua en forma d'"H" s'han de tenir precaucions extra ja que els estabilitzadors verticals es situen a la punta dels horitzontals, actuant com masses a la punta d'una biga i per tant canviant la seva freqüència natural d'oscil·lació durant el vol; el que provoca el que es coneix com a "fluttering". Per aquest motiu es tendeix a seleccionar perfils de més gruix del normal que ajuden a prevenir aquest fenomen [12]. En el cas del *Mriya*, al estar fabricat a la Unió Soviètica, no utilitza perfils NACA dels quals es possible obtenir el contorn i característiques, de manera que per fer les costelles dels estabilitzadors s'ha utilitzat una aproximació del perfil de les ales, del que si es coneix la secció, fent-lo simètric i establint el seu gruix aproximadament en un 13 per cent seguint les indicacions de [12].

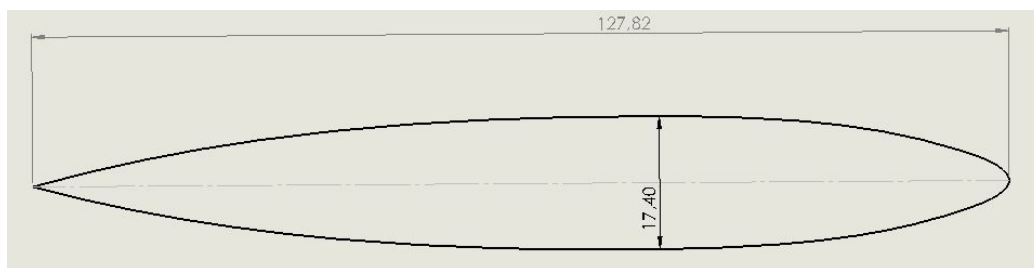


Figura 3.15: Perfil aeronàutic seleccionat per a l'estabilitzador del model a escala.

Fent una simple operació matemàtica sent x la espessor màxima del perfil i c la corda:

3. Disseny del model a escala

l'estabilitzador a dos plans paral·lels per posteriorment utilitzar una operació de recobriment per a obtenir un sòlid que representa tota la superfície horitzontal.

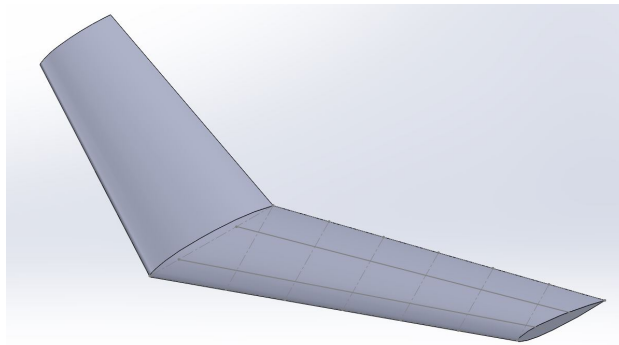
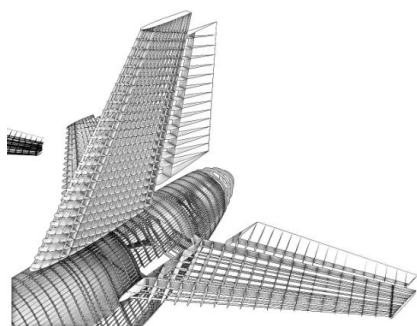
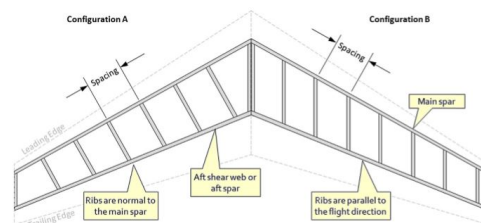


Figura 3.17: Estabilitzador horitzontal

A aquest sòlid se li poden extreure talls a la distància desitjada per obtenir les costelles però primer és necessari saber la separació entre aquestes i la seva orientació. “*General aviation aircraft design: applied methods*” [12] presenta dues possibles orientacions per a les costelles de les superfícies horitzontals: una primera en la que les costelles són normals al llarguer davanter, i una segona en la qual les costelles són paral·leles a la direcció de vol. Normalment s'utilitza la primera configuració ja que facilita la construcció de l'estructura al haver-hi un angle recte i a més en aquesta posició es redueix la llargada necessària de les costelles per a una mateixa superfície. L'An-225 fa servir aquesta primera configuració tal com es pot veure a les marques del recobriment de la cua de la figura 3.16 i als plànols estructurals de l'Antonov An-124, a partir del qual està dissenyat l'An-225.



(a) Representació de l'estructura de l'An-124. Proporcionada per Alexey Gromov de *Samara State Aerospace University*.



(b) Configuracions possibles de l'orientació de les costelles a una aeronau. Extret de [12].

Figura 3.18: Orientació de les costelles

Per tenir tots els paràmetres de disseny de la superfície horitzontal només fa falta obtenir la separació entre les costelles. A partir de la informació extreta de [12], on estableix que la separació entre costelles per a avions d'aquestes característiques ha de ser la meitat de la distància mitja entre el llarguer davanter i la vora d'atac de l'estabilitzador o ala en qüestió. Aquest fet es comprova a la figura anterior, on les costelles de l'Antonov An-124 compleixen la norma establerta. Com es pot veure a la figura 3.16 la distància mitjana entre l'arrel i la punta de l'estabilitzador entre el llarguer davanter i la vora d'atac és aproximadament 25 mil·límetres a escala pel que la separació entre costelles hauria de ser 12.5 mm. Tot i això per al model a escala es segueixen les consideracions seguides durant el disseny del fuselatge i la separació entre marcs estructurals i per tant es pren la decisió de duplicar aquesta separació i per tant reduir a la meitat el número de costelles a l'estabilitzador. Amb la configuració seleccionada es calcula un total de 22 costelles per a aquesta superfície; si es reduís la distància de separació aquests números es duplicarien, pel que també ho faria el pes i el preu, que pot arribar a ser alt degut a que el mètode de tall seleccionat és el tall làser.

Un cop conegudes totes les mesures i paràmetres de disseny de l'estabilitzador horitzontal es modelen les osques a les costelles per als encaixos amb els llarguers i també s'introdueixen forats per a reduir el pes d'aquest component estructural, una pràctica recurrent a la majoria d'estructures d'aeronaus. La distribució d'aquests forats s'obté consultant imatges de l'estructura inacabada d'un Antonov An-225.

3. Disseny del model a escala



(a) Distribució dels forats per reduir pes de les costelles de l'estabilitzador. Imatge de [10].



(b) Costella de l'estabilitzador horitzontal de l'An-225.

Figura 3.19: Forats per alleugerir el pes de la cua

Per al disseny de l'estabilitzador vertical es segueixen les mateixes consideracions explicades amb anterioritat per a la superfície horitzontal amb dues variacions. Com que el *Mriya* és una aeronau gran té dos llarguers en aquesta superfície de la mateixa forma que l'Antonov An-124 representat a la figura anterior. Per a millorar la integritat estructural del model a escala un cop hagi estat construït i per tal de reduir l'ús de cola es decideix que els llarguers de l'estabilitzador vertical formaran part de la mateixa peça que la biga que aguanta tot l'estabilitzador vertical i que connecta amb la superfície horitzontal.

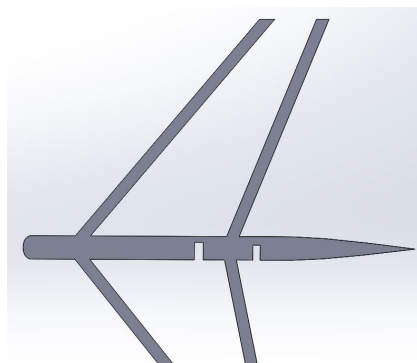


Figura 3.20: Estructura de l'estabilitzador vertical de l'An-225.

Degut a que el llarguer davanter que aguanta les costelles de la superfície vertical té un angle de fletxa pronunciat, en aquest cas les costelles es posicionen normals al llarguer posterior, tal i com es fa en el cas de l'An-124. En aquest cas els dos llarguers són fixes, de manera que per a poder fer lliscar les costelles fins a la seva posició durant la construcció del model a escala es té en compte la distància de separació de la punta i es fa un tall prou llarg per

que totes les peces puguin passar per allà com es pot apreciar a la següent figura.

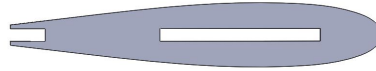


Figura 3.21: Costella de l'estabilitzador vertical de l'An-225.

Finalment es calcula l'angle de diedre de l'estabilitzador i es modelen dos travessers per a muntar aquesta part de l'estructura al fuselatge de l'aeronau. Seguint totes les explicacions d'aquest apartat el model de la cua del *Mriya* queda de la següent manera:

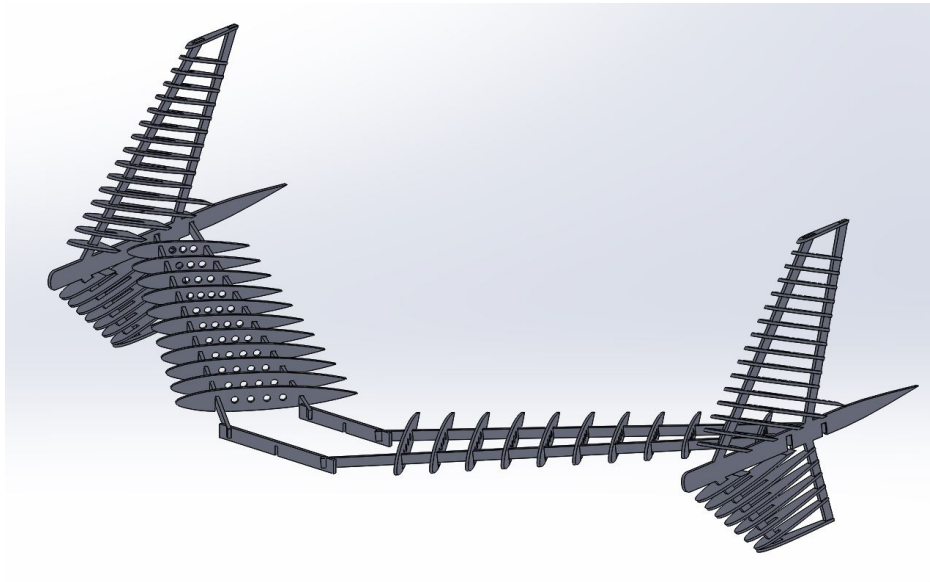


Figura 3.22: Model de l'estabilitzador de l'Antonov An-225 mitjançant *SolidWorks*.

3.3.5 Disseny de l'ala

L'Antonov An-225 utilitza una configuració d'ala alta, comú en la majoria d'avions de càrrega, pel fet que facilita molt el moviment de vehicles i de la mercaderia al voltant de l'aeronau, agilitzant les operacions de càrrega i descàrrega. Com s'ha explicat en seccions anteriors, la punta de l'ala és idèntica a la de l'An-124, però la caixa d'ala i l'estructura de l'arrel estan modificades per tal de poder ampliar l'envergadura fins als 88.4 metres. A més, el fet de incorporar tres motors per semi-ala requereix reforços poc comuns en altres avions per a poder aguantar el pes.

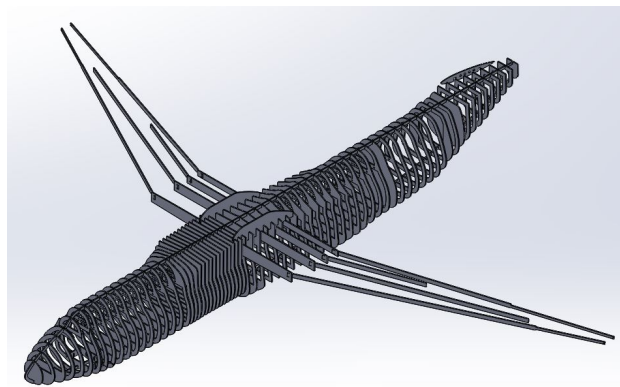
El primer pas per al disseny de l'ala és modelar els llarguers que subjecten les costelles al llarg de l'envergadura. La majoria d'aeronaus bimotors fabricades per Boeing i Airbus acostumen a fer ús de dos llarguers: el primer situat a un 25 % de la corda, i el segon entre el 65 % i el 75 %. Exemples d'aquesta configuració són el 737, 757 o el 777 en el cas de Boeing, l'A320 i fins i tot l'A380, que utilitza quatre motors, en el cas del fabricant europeu. Alguns models incorporen un tercer llarguer auxiliar a la meitat de la corda que arriba fins a un 25% de l'envergadura; només el Boeing 747 fa ús de 4 llarguers: dos principals i 2 auxiliars que arriben fins al 25% i 50% de l'envergadura respectivament [13]. L'An-225 segueix una disposició molt similar a la del B-747; té dos llarguers principals que recorren tota l'envergadura, un primer llarguer auxiliar fins a un 50% i un segon llarguer auxiliar fins al 75%. La seva ubicació exacta es veu clarament indicada utilitzant línia d'eix a la vista de planta de la figura 3.1, i es pot confirmar a imatges de la caixa d'ala de l'estructura inacabada com la que s'exposa a continuació.



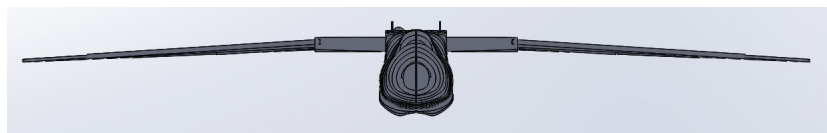
Figura 3.23: Estructura de la caixa d'ala de l'An-225. Imatge de [10]

Com es pot apreciar hi ha 4 llarguers perpendiculars al fuselatge que formen

la caixa d'ala, fins al punt de la imatge on comencen a seguir l'angle de fletxa de l'ala. Per tant hi ha una discontinuïtat en aquests llarguers, que es separen en dues seccions: una primera a la caixa d'ala i que es connecta amb el fuselatge, i una segona que s'uneix a la caixa d'ala i suporta la resta de les costelles fins a la punta. Aquesta separació en dos trams de l'ala també permet que canviï l'angle de fletxa i de diedre al llarg de l'ala. L'angle de diedre és negatiu a partir de la segona secció com és comú a les aeronaus d'ala alta i la fletxa es veu incrementada també en aquesta segona part de l'estructura. Per al modelatge de l'estructura d'ala i els angles dels llarguers s'han utilitzat les vistes del plànol 3.1 i trigonometria bàsica. El resultat de l'estructura de l'ala sense les costelles és el següent:



(a) Vista isomètrica.



(b) Vista frontal.

Figura 3.24: Llarguers de l'ala de l'An-225.

Per a modelar les costelles es segueix el mateix procediment desenvolupat a l'estabilitzador. En aquest cas el perfil aeronàutic s'obté directament del plànol exposat a la figura 3.1 on hi apareixen les seccions de l'ala en diversos punts de l'envergadura. S'utilitzen aquests perfils per a fer dues operacions de recobriment de *SolidWorks*, una per a cada secció de l'ala amb angle de fletxa i diedre diferents, i es modela un sòlid de tota l'ala del qual es poden obtenir les costelles utilitzant operacions de tall. Per a fer les operacions de tall es requereix conèixer la distància de separació entre les costelles i la seva orientació. L'orientació segueix el mateix principi explicat per a l'es-

3. Disseny del model a escala

tabilitzador, però com que en aquest cas el llarguer principal es divideix en dues seccions i canvia el seu angle de fletxa les costelles de la caixa d'ala són paral·leles a la direcció de vol a la vegada que són normals al llarguer davanter; quan canvia l'angle de l'estructura les costelles segueixen sent normals al llarguer i per tant canvien la seva orientació respecte la direcció de vol. Aquest fenomen en el que les costelles d'una ala no són totes paral·leles entre si és comú a moltes aeronaus per a facilitar la unió entre l'ala i el fuselatge; un exemple és l'estructura de l'Airbus A320 com es pot veure a la següent imatge.

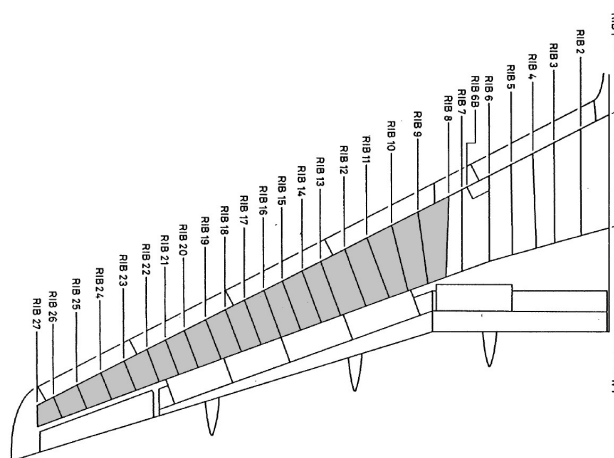


Figura 3.25: Posició de les costelles de l'Airbus A320. Imatge extreta de [11].

Pel que fa a la separació es segueix la teoria obtinguda de [12] que estableix que la separació entre costelles és aproximadament la meitat de la distància mitjana entre la vora d'atac i el llarguer principal davanter. Per a l'An-225 es té en compte la segona secció de l'ala, que no pertany a la caixa d'ala, per a realitzar aquest càlcul; això és degut a que com que el llarguer de la caixa d'ala és normal a la direcció de vol, la distància fins a la vora d'atac no segueix la mateixa tendència que a la resta de l'ala i per tant no és representativa. Extret del plànol 3.1 a escala real de l'aeronau la distància en qüestió és de 1950 mm a l'arrel i de 550 mm a la punta de l'ala pel que la distància mitjana resulta de 1250 mm, pel que la separació de costelles hauria de ser la meitat d'aquest valor i situar-se en 625 mil·límetres, 12.5 mm a escala 1:50 del model. Aquest valor concorda amb les dades d'altres aeronaus consultades a [13], on es pot veure que la separació habitual de les costelles en totes les aeronaus de la serie 7X7 de Boeing i A3XX d'Airbus és de 610 mm. Amb aquestes dades es pren la mateixa decisió de disseny que per al fuselatge i

l'estabilitzador de modelar la meitat d'aquestes costelles i per tant establir una separació de 25 mm a escala del model. Usant aquest criteri s'obtenen 36 costelles per semi-ala enlloc de les 72 que té l'estructura real, de manera que es redueix a la meitat el número de costelles reduint també el pes i el preu. En el cas de l'ala és de vital importància disminuir el pes el màxim possible, ja que els llarguers actuen com bigues de fins a 70 centímetres de longitud, amb només 5 mm d'amplada màxima a les puntes de l'ala condicionat per la pròpia amplada de les costelles en aquest tram.

Distància entre costelles a escala	25 mm
------------------------------------	-------

Finalment es modelen les osques necessàries a les costelles per a poder encaixar als llarguers de l'aeronau. És numeren imposant que la costella més pròxima al fuselatge és la 1, fins la última a la punta d'ala, que rep el número 36. La posició d'aquests encaixos s'obté de la vista de planta del plànol 3.1 i l'angle d'atac i la respectiva torsió entre l'arrel i la punta es calcula a partir de la vista lateral i s'aplica a les costelles incorporant aquests angles als encaixos. Les costelles de les ales, així com les de l'estabilitzador, també tenen forats per a reduir el seu pes, com es pot apreciar directament a la figura 3.23 hi ha un forat entre cada llarguer a la caixa d'ala. A causa de la falta d'informació per a la resta de l'ala es decideix seguir el mateix principi, conjuntament amb la informació extreta de [11], i modelar un forat entre cada parell de llarguers per a alleugerir les seccions fins a l'últim tram, on només hi queden dos llarguers. Per a les costelles d'aquest últim tram més estret es segueix la mateixa disposició de forats que a les costelles de la cua degut a que la seva mida és similar i es tenen imatges de la posició i mida dels forats de l'estabilitzador.

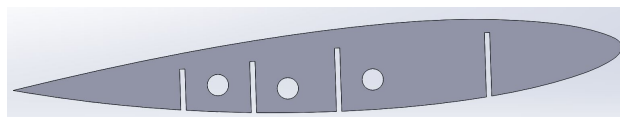


Figura 3.26: Model a escala de la costella 6 de l'Antonov An-225. Modelat amb *SolidWorks*.

Pel que fa a la vora d'atac i a la vora final és on es situen els sistemes hipersustentadors i de control, tant els flaps i slats com els alerons. Es considera que aquests elements són elements mòbils i per tant no es tracta de parts purament estructurals, a més tampoc es té cap plànol del sistema

3. Disseny del model a escala

ni del seu funcionament, pel que es decideix no incorporar aquests sistemes al model a escala.

A la punta d'ala la secció és massa prima per a modelar-la utilitzant costelles pel que es decideix fer-ho utilitzant una sola peça plana de fusta de balsa amb la forma de la punta d'ala de l'An-225. A més aquesta construcció és fidel a la construcció de puntes d'ala d'altres avions que incorporen *winglets* fabricats a part de l'estructura i acoblats amb posterioritat a l'ala.

La unió entre l'ala i el fuselatge és un dels punts més crítics de l'estructura d'una aeronau, ja que és l'encarregat de transferir les forces aerodinàmiques i de propulsió dels motors al fuselatge, i per tant, a la càrrega útil de l'avió. Als avions de passatgers d'ala baixa aquesta junta s'ubica a sota de la cabina de passatgers, on els llarguers de l'ala travessen el fuselatge i s'entrecreuen amb els llarguers del fuselatge i s'acoblen als marcs estructurals. En el cas de l'Antonov An-225, al tractar-se d'una aeronau d'ala alta aquesta unió es produeix per sobre de la bodega i és aquest fet el que causa la divisió de la cabina explicada a la secció 3.3.2. Com que el fuselatge del model del *Mriya* s'ha dissenyat reduint la quantitat de llarguers, aquests no estan preparats per a suportar tot el pes de l'ala a tracció, sinó que compleixen una funció de guia per als marcs de l'estructura del fuselatge; per aquest motiu es modelen dues bigues paral·leles a la direcció de vol que s'introdueixen a ranures fetes especialment als marcs del fuselatge. D'aquesta manera amb unes simples ranures als quatre llarguers de la caixa d'ala es pot acoblar tota l'ala damunt d'aquestes dues bigues.

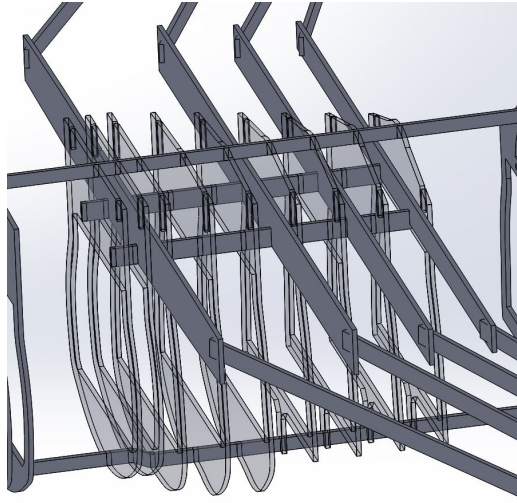
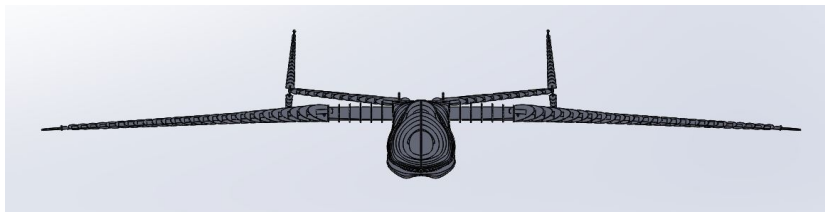


Figura 3.27: Vista isomètrica de detall de la unió entre ala i fuselatge.

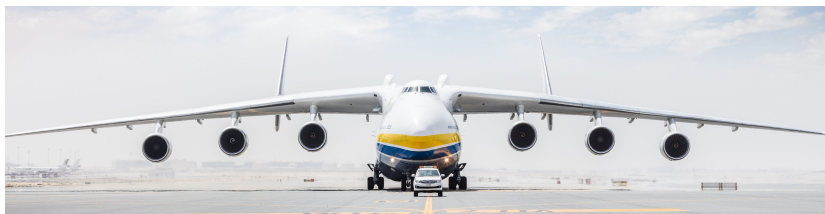
Utilitzant aquest mètode d'unió també es facilita el transport del model a escala, un punt important a tenir en compte. El model fa 1.76 metres d'envergadura i 1.68 de llarg, el que en pot dificultar molt el transport o emmagatzematge en cas de necessitat. Reposar l'ala damunt aquestes bigues mitjançant encaixos resulta en que no es necessiti cola i que aquesta part del model sigui desmuntable si es requereix, separant el model en dues parts més manejables.

3.3.6 Acoblatge del model a escala

Un cop estan dissenyats els diferents components que formen l'estructura de l'Antonov An-225 s'acoblen entre si, utilitzant la funció de *SolidWorks* que permet muntar acoblatges diferents entre si i fent us dels encaixos dissenyats i exposats a les seccions anteriors. Per a assegurar la qualitat del model a escala es fa una operació de verificació de simetria que incorpora *SolidWorks*; aquesta serveix per a verificar que totes les peces i l'acoblament és simètric d'esquerra a dreta de l'aeronau. També es duu a terme una verificació d'errors que serveix per detectar si hi ha alguna geometria impossible com podrien ser sòlids que intersequessin l'un amb l'altre. Ambdues verificacions donen un resultat satisfactori. A continuació es mostren imatges del model de *SolidWorks* comparades amb imatges reals de l'Antonov An-225.

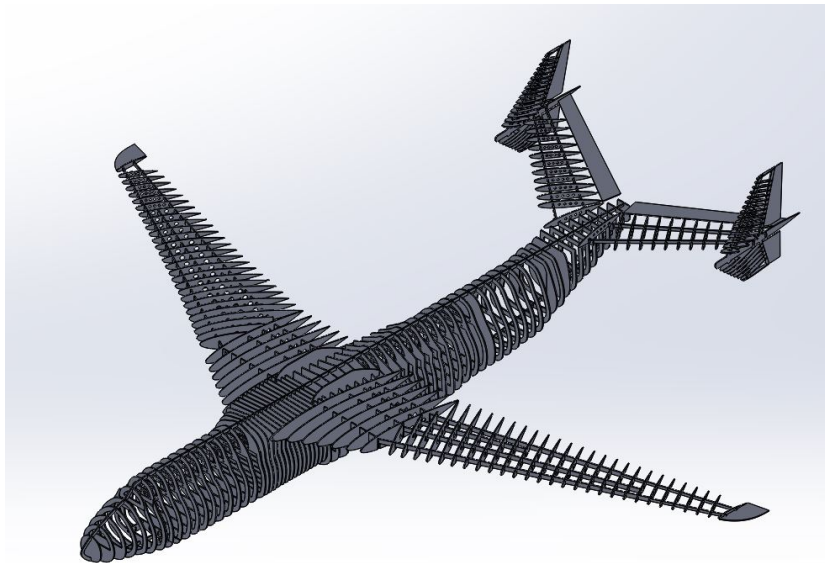


(a) Model fet amb *SolidWorks*.



(b) Imatge extreta de [14]

Figura 3.28: Vista frontal del model.



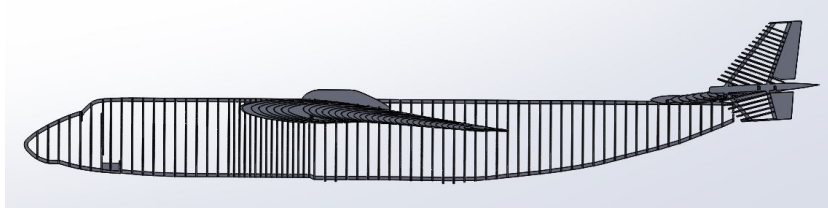
(a) Model fet amb *SolidWorks*.



(b) Imatge extreta de [9]

Figura 3.29: Vista isomètrica del model.

3. Disseny del model a escala



(a) Model fet amb *SolidWorks*.



(b) Imatge extreta de [9]

Figura 3.30: Vista lateral del model.

4. Tall del model a escala

4.1 Selecció del tall làser

El mètode de tall es selecciona prèviament al disseny del model fet amb *SolidWorks* per a tenir en compte les limitacions i requeriments que imposa el mètode durant el procés de disseny. Tot i això s'ha de seleccionar el proveïdor d'aquests serveis d'entre les diferents empreses que s'hi dediquen.

La intenció inicial per a la realització del tall làser d'aquest projecte era fer us dels serveis que proporcionen a Punt Multimèdia de FAB Casa del Mig, on disposen d'una talladora làser i també ofereixen cursos per a aprendre a fer servir la maquinaria. Al fer un autoservei del tall làser es reduïa el preu a la vegada que s'obtenien els coneixements per a fer servir màquines de tall làser, el que permetia fer proves amb els diversos materials i peces dissenyades al mateix temps que es dissenyava la maqueta, optimitzant el model a escala final. Això però no ha estat possible degut al COVID-19, ja que ha causat la cancel·lació d'aquests serveis. Per tant es decideix fer us d'un servei de tall làser convencional, en el qual s'envien els plànols a l'empresa i aquesta s'encarrega del tall i l'enviament de les peces. El COVID-19 també ha causat el tancament temporal d'alguna d'aquestes empreses, però es seleccionen dues opcions per tal de demanar un pressupost per el tall de les peces de la maqueta. La primera empresa consultada respon desfavorablement ja que no disposa dels materials sol·licitats degut a la pandèmia i la segona, Espai Model, respon amb un pressupost per a totes les peces de la maqueta incloent els materials necessaris.

Per tant es selecciona Espai Model SL. per al tall làser de les peces de la

maqueta; ofereixen un pressupost¹ conjunt del servei de tall amb els materials dels quals disposen al seu catàleg [4] i que compleixen la decisió presa a la secció de materials 3.2. A més l'empresa s'especialitza en el tall de maquetes i ofereix consell dels seus professionals per a garantir un resultat òptim del model a escala.

4.2 Plànols per al tall làser

Per a obtenir les peces mitjançant tall làser s'han de dibuixar els plànols de les peces a partir del model fet amb *SolidWorks* complint amb els requeriments exposats a la secció 3.1.1. Per tal de poder complir amb els requeriments de capes de colors per als diferents tipus de tall es pren la decisió de fer els plànols de tall mitjançant *AutoCad* d'*AutoDesk*, concretament de la seva funció de disseny en 2D, que permet crear diferents capes i assignar colors a cada una d'elles amb facilitat.

Com que el model en tres dimensions està fet amb *SolidWorks* primer s'han de convertir les peces en tres dimensions a plànols. Per a fer això s'utilitza una de les funcions que ofereix el programa de CAD per a convertir peces a plànols des d'una vista seleccionada; com que totes les peces estan dissenyades amb la intenció de ser tallades amb un plànol només fa falta una vista lateral de cada peça. S'agrupen els plànols de cada peça dins marcs de la mida de la plataforma de la màquina de tall làser² separant les unes de les altres la distància necessària per a que no es produeixin trencs però reduint la quantitat de material utilitzat per tal de disminuir al màxim possible l'impacte ambiental i el preu de l'operació. Per a facilitar el posterior muntatge de la maqueta s'ordenen les peces als plànols; per al fuselatge es comença posant les peces des del morro de l'aeronau fins a la cua i les de les ales i estabilitzador des de l'arrel fins a la punta. Un cop es tenen els plànols en dues dimensions a *SolidWorks*, es poden exportar utilitzant el format .dwg que s'especifica als requeriments i es poden modificar mitjançant *AutoCad*.

¹Els detalls es poden consultar al document adjunt de pressupost.

²Mides de materials i maquinaria proporcionades per Espai Model SL.

4. Tall del model a escala

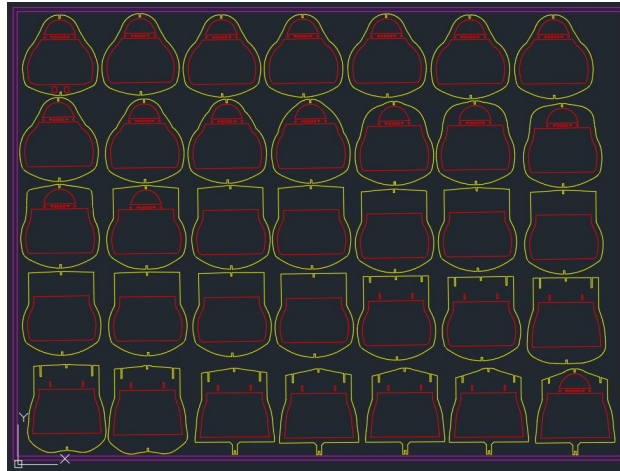
Es creen tres capes diferents, assignant a cada una un color:

- Magenta: delimita el requadre d'acció de la màquina de tall làser així com els extrems del material. Es traça un “offset” cap a l'interior de 8 mm per assegurar que cap peça queda massa a prop de les vores. La mida de la plataforma de tall és de 1300x900 mm, la del tauler de DM és 1220x900 mm i cada làmina de balsa 1000x100 mm.
- Vermell: capa de tall interior. En el cas del model de l'Antonov An-225 són els forats de les costelles i l'interior dels marcs estructurals, per exemple.
- Groc: capa de tall exterior. Aquelles línies que delimiten el contorn de les peces.

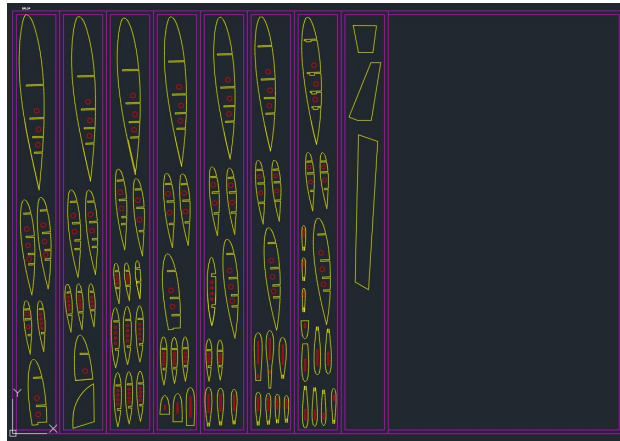
També es creen “ponts” en el traçat de cada peça. Aquests “ponts” consisteixen en crear una discontinuïtat de 0.8 mil·límetres a algunes línies de cada peça, de manera que la talladora làser no en talli per complet el contorn i aquestes quedin unides al tauler. Al estar ordenades com s'ha explicat amb anterioritat i disposar dels plànols on es pot veure l'ordre de les peces el muntatge de la maqueta es fa molt més fàcil ja que quan es necessita una peça en concret només fa falta buscar-la a la làmina corresponent i separar-la de les demés trencant aquest “pont”, que és prou prim per separar-se sense la necessitat d'emprar cap eina.

En una situació normal es pot anar al taller d'Espai Model a recollir les peces un cop està fet el tall làser. Degut a la situació provocada per el COVID-19 les peces han hagut de ser empaquetades i enviades per correu; com que els llarguers del fuselatge són massa llargs per a un paquet estàndard s'han hagut de tallar en dues parts.

A continuació es mostren exemples dels plànols de tall de les peces acabats i enviats a Espai Model SL. Tots els plànols es poden consultar detalladament al document adjunt de plànols.



(a) Marcs estructurals del fuselatge. Tauler de DM.



(b) Ala i estabilitzador. Fusta de balsa.

Figura 4.1: Plànols per al tall làser de les peces fets amb *AutoCad*.

5. Muntatge del model a escala

La primera tasca a dur a terme per a completar el muntatge de la maqueta és la identificació i numeració de les peces. Com s'ha explicat a la secció anterior, les peces estan organitzades als taulers, de forma que utilitzant els plànols 4.1 i un marcador permanent es poden indicar totes amb el seu respectiu codi. Això facilita molt el muntatge del model a escala, ja que quan es necessita una peça en concret durant el procés només fa falta buscar el número de tauler i peça per a trobar-la ràpidament. És important puntualitzar que durant tot el procés de muntatge no fa falta fer cap operació d'acabat a aquestes peces, ja que el tall làser es suficientment precís i net per evitar rebaves o acabats indesitjats.



Figura 5.1: Taulers de fusta de balsa amb les costelles de l'ala i l'estabilitzador.

Tot i el disseny de les peces amb encaixos entre elles per tal de minimitzar l'ús de cola, se'n necessita una petita quantitat per a assegurar que les peces romanen al seu lloc, i que aquelles que han d'aguantar-ne d'altres no cedeixin. Per a aquesta tasca es selecciona cola blanca, una cola forta i transparent un cop seca i que es recomana per a enganxar fusta, tant en el cas de la fusta de balsa com el DM. A més, és una cola que no causa desperfectes a la fusta, una característica a tenir en compte, ja que la balsa és un material porós i es podria fer malbé si se li aplicués un material més agressiu. Un altre avantatge que comporta l'ús de cola blanca és el fet que tot i oferir un resultat fort un cop seca, es pot desencolar tallant les unions amb un cúter, i per tant en el cas de cometre algun error durant el muntatge del model, hi hauria marge per a rectificar i poder desencolar les peces que fossin necessàries.

Aprofitant que el model a escala està dissenyat fent ús d'acoblements separats, per a fer el muntatge també es construeixen aquestes parts per separat amb l'objectiu d'acabar-les unint per a completar la maqueta. Treballar d'aquesta forma facilita el muntatge, ja que al tractar-se d'una rèplica de 1.76 metres d'envergadura i 1.68 metres de llarg pot comportar dificultats per

5. Muntatge del model a escala

moreu-la i afegir peces. Per tant, es comença muntant la caixa d'ala de l'aeronau, formada per els quatre llarguers principals que travessen el fuselatge i les primeres 7 costelles de cada banda.

El primer pas és marcar la posició de les costelles al llarg del llarguer principal. Amb un regle, un llapis i fent servir els plànols de referència, es fan marques cada 25 mil·límetres. Un cop estan les marques fetes s'extreuen les costelles de la número 1 fins la 7 de les seves respectives làmines de fusta de balsa, i es col·loquen sense cola a la seva posició per a presentar el resultat final i verificar que no es comet cap error. Un cop estan totes les costelles al seu lloc s'aplica una gota de cola blanca a cada unió, per a assegurar que no llisquen al llarg del llarguer i que la separació entre elles és sempre la mateixa. Aquest últim pas es fa utilitzant un escaire per a verificar que totes les costelles mantenen la seva perpendicularitat respecte el llarguer principal.



Figura 5.2: Muntatge de les costelles de la caixa d'ala.

Un cop la cola està seca, es fa el mateix procés per a la semi-ala oposada, i finalment s'introdueixen els 3 llarguers que falten als seus respectius encaixos, que es poden apreciar a la figura anterior. A continuació s'exposa el resultat final de una semi-ala de la caixa d'ala.



Figura 5.3: Caixa d'ala de la maqueta

A continuació es segueix un procediment similar per a la continuació de l'ala. Es comença també marcant la posició de les costelles al llarguer davanter, i s'encolen totes formant un angle recte, verificat fent ús de l'escaire. Un cop esta la cola seca i les peces formen l'angle desitjat i estan separades per els 25 mil·límetres planejats al disseny es poden muntar els tres llarguers que falten. Degut a que els encaixos de les costelles ja estan dissenyats seguint els angles i gruixos necessaris, només fa falta marcar la distància des de l'arrel del llarguer fins la primera costella i llavors es pot situar cada un a la seva posició en la que queden perfectament encaixats. Finalment s'aplica una gota de cola a la unió cada dues costelles, alternant la costella per a cada llarguer, per a que l'estructura quedi ben fixada.

5. Muntatge del model a escala

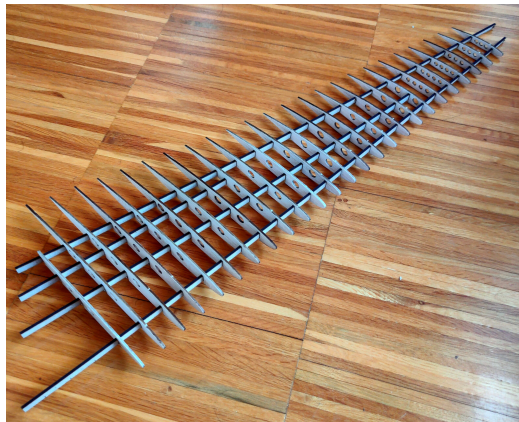


Figura 5.4: Muntatge de l'ala la des de la caixa fins a la punta.

Per a la superfície horitzontal de l'estabilitzador el procediment es una simplificació del de l'ala, ja que és més petit i només disposa de dos llarguers. La superfície vertical de l'estabilitzador sí que presenta diferències pel que fa al muntatge, ja que els dos llarguers formen part de la primera peça i segueixen la mateixa direcció que la corda dels perfils per necessitats de disseny, de manera que els encaixos no són perpendiculars a la corda sinó paral·lels. A més en aquesta secció, les costelles són perpendiculars al llarguer posterior, de manera que és allà on es fan les marques per a indicar la posició dels perfils. Un cop està marcada la posició de cada costella es fan lliscar passant els llarguers a través dels encaixos fins la seva posició, on s'aplica una gota de cola blanca per a que retenguin la seva posició.



Figura 5.5: Muntatge de l'estabilitzador vertical.

El resultat obtingut per a l'estabilitzador vertical i horitzontal es pot veure a la següent figura:



(a) Estabilitzador horitzontal.



(b) Estabilitzador vertical.

Figura 5.6: Muntatge complet dels dos components de l'estabilitzador.

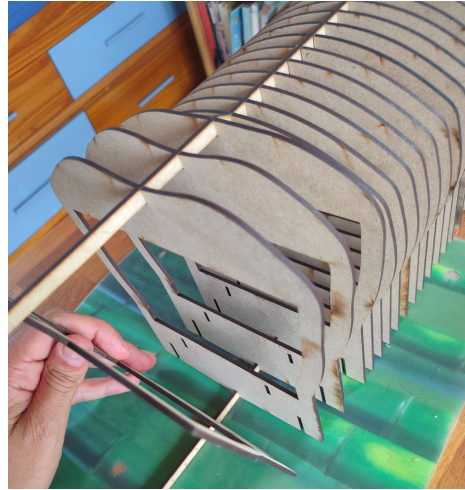
Per al muntatge del fuselatge es comença per els extrems. Primer es subjecta el llarguer superior damunt una superfície plana aprofitant que és horitzontal, a diferència de l'inferior. Amb un llapis, un regle i utilitzant els plànols fets amb *SolidWorks*¹ de l'aeronau, es fa una marca allà on ha d'anar cada marc estructural. Un cop està indicada la seva posició s'utilitzen els encaixos dissenyats per a situar les peces al seu lloc, i es fixen amb una gota de cola blanca. Per a verificar que cada peça es perpendicular al llarguer superior s'utilitza un escaire; per a comprovar la separació entre totes les peces del fuselatge s'utilitza un llistó de fusta tallat del mateix gruix que la distància de separació i s'introdueix als espais entre les peces, com es pot veure a la següent figura.

¹Es poden consultar al document adjunt de plànols.

5. Muntatge del model a escala



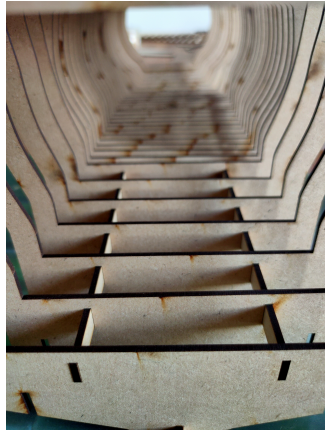
(a) Verificació de la distància entre peces.



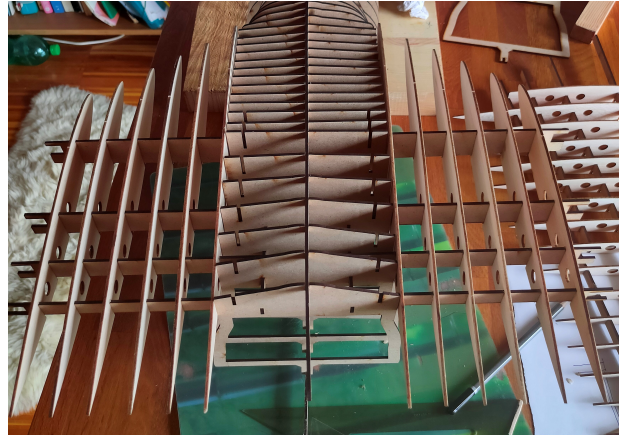
(b) Col·locació de les peces.

Figura 5.7: Muntatge dels marcs estructurals del fuselatge.

Es segueix el mateix procediment per a la resta del fuselatge, muntant-lo per dos trams separats a causa d'haver partit els seus dos llarguers per necessitats de l'enviament de les peces tal i com s'explica al capítol anterior. Tot i això es produeix una variació durant el muntatge del fuselatge per a introduir la caixa d'ala i els seus suports. Com que els llarguers de la caixa d'ala travessen el fuselatge transversalment, la caixa d'ala s'ha de muntar al seu lloc a la vegada que es col·loquen els marcs estructurals que l'envolten. La caixa d'ala es fixa damunt dues bigues paral·leles a la direcció de vol que s'encaixen a ranures fetes expressament als marcs, de manera que no es requereix cola per a unir aquests dos components.



(a) Bigues de suport de la caixa d'ala.



(b) Posició final de la caixa d'ala al fuselatge.

Figura 5.8: Muntatge de la caixa d'ala al fuselatge.

Un cop completada la part davantera del fuselatge amb la caixa d'ala muntada es continua amb la part posterior seguint els mateixos procediments, fins que s'obté el fuselatge amb els marcs estructurals corresponents separat en dues parts. S'uneixen aquestes dues parts del fuselatge mitjançant cola a les unions entre els llarguers per a assegurar que tot el fuselatge es manté com un sol conjunt.

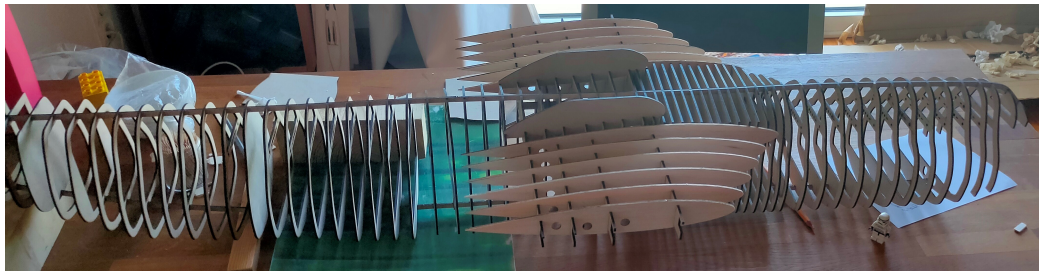


Figura 5.9: Fuselatge complet incloent la caixa d'ala.

Finalment l'últim component que es munta és la comporta; per fer-ho es col·loquen els marcs estructurals que la formen encaixats a la peça que forma el perfil del morro de l'aeronau. Utilitzant els plànols es marca la posició de cada un d'ells i amb una gota de cola blanca es fixen a la seva posició final.

5. Muntatge del model a escala

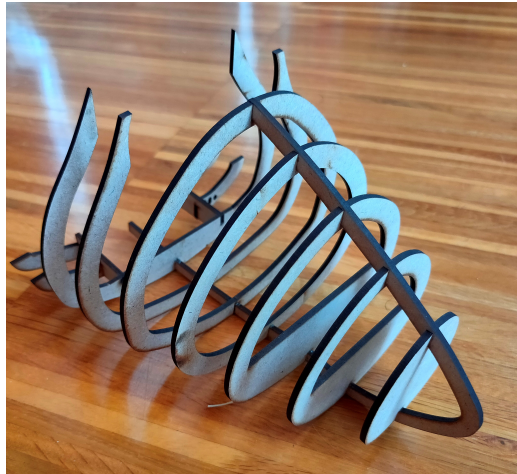


Figura 5.10: Comporta del model a escala muntada.

Un cop es tenen tots els components muntats es comença a fer l'acoblament final de l'estructura del model a escala de l'Antonov An-225. S'utilitza el fuselatge com a base i s'enganxen els travessers que suporten la secció de cua a la seva posició; damunt els travessers s'encaixa l'estabilitzador horitzontal, que es situa formant l'angle de fletxa desitjat gracies a la mida i posició dels encaixos. Com que l'estabilitzador horitzontal també té un angle de diedre positiu i a més ha de subjectar tot el pes de l'estabilitzador vertical a la seva punta es col·loca un suport de metacrilat per a subjectar aquest component. Això assegura que l'angle i la posició final són els reals utilitzant un transportador d'angles; a més com que s'utilitza metacrilat, que és transparent, es minimitza l'impacte visual dels suports al model. Un cop fixades les superfícies de control horitzontals, utilitzant cola blanca entre els encaixos de l'estabilitzador vertical i els dos llarguers de la cua es fixa la superfície vertical, formant un angle de 90 graus amb la horitzontal.



Figura 5.11: Estabilitzador del model a escala d'Antonov An-225.

Finalment s'uneixen les ales a la caixa d'ala fent ús dels encaixos als llarguers de la caixa; els llarguers de l'ala s'introdueixen dins les ranures dissenyades. Com que a partir del punt d'unió hi ha un angle de diedre negatiu, l'ala s'aguanta al seu lloc amb l'angle desitjat degut al pes i a la mida dels encaixos, com s'exposa a la següent figura.



Figura 5.12: Unió de l'ala a la caixa d'ala.

5. Muntatge del model a escala

Per acabar amb la construcció del model a escala es munten les dues peces dels extrems de les ales, i es col·loquen les costelles que van damunt les unions de la cua amb el fuselatge i de l'ala amb la caixa d'ala. A continuació s'exposen imatges del model a escala acabat des de varies posicions i detall de les parts més destacades. A algunes imatges s'exposa una figura de Lego com a referència de la mida; la figura seria equivalent a una persona de 2 metres d'alçada.



Figura 5.13: Model a escala de l'Antonov An-225.



Figura 5.14: Vista lateral del model a escala.



Figura 5.15: Vista frontal del model a escala.



Figura 5.16: Vista davantera del model a escala.

5. Muntatge del model a escala

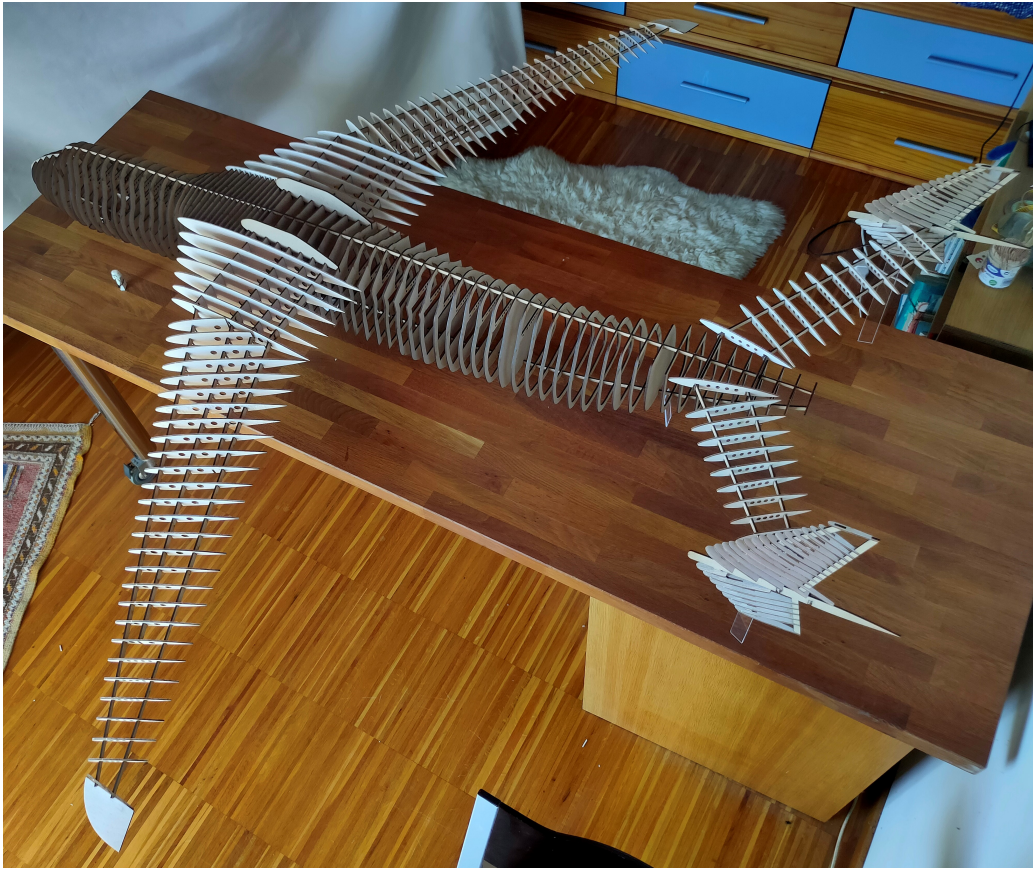


Figura 5.17: Vista superior del model a escala.

6. Impacte ambiental

L'impacte ambiental d'aquest estudi es separa en dues parts: la primera fase de disseny i el muntatge del model a escala. Durant la fase de disseny l'únic impacte a tenir en compte és el consum elèctric per part de l'ordinador. Per a fer el càlcul simplement es requereix la quantitat d'hores que s'ha utilitzat i el seu consum. Utilitzant les pròpies dades proporcionades per la consola de l'ordinador el consum mitjà, comptant la pantalla, és de 280 watts. Sabent que un crèdit ECTS equival a 25 hores de feina, i segons la planificació exposada al project charter 14 de les 20 setmanes de dedicació al projecte de 24 crèdits requereixen l'ordinador, és calcula un ús total de 420 hores. Tenint en compte la potència i les hores d'ús s'obté un consum energètic total de la fase de disseny 117.6 kWh.

Consum energètic ordinador	117.6 kWh
----------------------------	-----------

Tot i això l'ordinador s'ha alimentat utilitzant electricitat provinent de plaques solars, per tant l'impacte ambiental causat durant la fase de disseny es pot considerar nul.

Pel que fa a la segona fase també s'ha de tenir en compte el consum energètic de la màquina de tall làser. Aquesta té una potència de 80 watts i s'utilitza durant 2 hores per a fer el tall de les peces. Degut a que la seva potència i el temps d'ús són menyspreables davant l'energia consumida per l'ordinador es decideix no tenir en compte l'impacte energètic del tall làser.

Per a la fase del muntatge del model a escala també s'ha de tenir en compte l'ús de materials. A la següent taula s'exposen els materials que s'han utilitzat.

Material	Quantitat
Taulers DM	3 unitats
Làmines fusta de balsa	16 unitats
Cola blanca	100 grams

Taula 6.1: Materials utilitzats durant el muntatge del model. Les mides dels taulers es poden consultar a la taula 3.1.

Pel que fa a l'ús de materials s'ha de tenir en compte que durant la fase de disseny i el dibuix dels plànols s'ha intentat reduir al màxim la quantitat de fusta necessària organitzant de forma òptima les peces per a l'operació de tall. L'ús de cola blanca també es veu molt disminuït gràcies al disseny dels encaixos entre les peces, que permeten que aquestes s'aguantin sense cola o amb una quantitat molt petita.

7. Conclusions

S'ha estudiat l'estructura de l'Antonov An-225, un avió únic tant per la seva història durant el projecte espacial Soviètic com per els seus rècords de transport de càrrega establerts recentment. Això, i el fet que és l'aeronau operativa amb més envergadura, li concedeixen una distribució estructural única i ha requerit tant informació de disseny d'aeronaus com adquirir nous coneixements en el disseny de models a escala per a completar la maqueta. Durant l'estudi de l'estructura s'ha pogut comparar el *Mriya* amb avions convencionals, i analitzar què fa tan especial l'An-225. Aquesta recerca d'informació s'ha pogut traslladar al disseny del model mitjançant *SolidWorks* on s'ha adaptat l'estructura de l'aeronau a una construcció amb peces preparades per tallar en taulells plans de fusta, construint diversos sistemes d'unió entre elles per tal de reduir l'ús de cola a la vegada que s'ha mantingut l'aparença i disposició dels diferents elements estructurals el més fidel possible al model real. Al tallar les peces amb tall làser hi ha hagut una familiarització amb aquest mètode de fabricació, cada vegada més accessible i amb més història d'ús per a la realització de models a escala. La intenció inicial era aprendre a fer servir les màquines de tall làser i el seu software això no va ser possible degut al COVID-19; tot i això al emprar el tall làser s'ha entrat en contacte amb les seves restriccions de disseny i els seus avantatges, i el producte final obtingut ha estat de qualitat. Finalment el muntatge del model a escala ha posat fi a aquest estudi, utilitzant els plànols obtinguts durant la fase de disseny i les peces tallades amb làser. S'ha acomplert satisfactòriament l'objectiu, al mateix temps que s'ha aprofundit en coneixements molt diversos, des de disseny d'avions fins a l'ús de software de CAD, a la vegada que se n'han adquirit de nous, com el muntatge d'un model a escala d'aquestes dimensions.

Bibliografia

- [1] Russian Aviation Museum. An-225 heavy load cargo aircraft, Antonov OKB.
- [2] The Antonov Giants: An-22, An-124, & An-225.
- [3] Antonov Airlines. Antonov Brochure, 2020.
- [4] Matèria PRIMA.
- [5] Tableros Gabarró.
- [6] Vasily Koba. Spotters.Aero Antonov Design Bureau Antonov An-225 Mriya.
- [7] AeroFred-Model Airplane and Boat Plans.
- [8] Gloria Stepanov. An-225 Mriya is the world's largest aircraft - Gelio.
- [9] Alex Beltuykov. Airliners.net — Aviation Photography, Discussion Forums & News.
- [10] K. Henri. l'An-225 en Chine : Antonov dévoile plus de détails — East Pendulum.
- [11] Christian Anhalt, Hans Peter Monner, and Elmar Breitbach. Interdisciplinary Wing Design-Structural Aspects. Technical report, 2003.
- [12] Snorri Gudmundsson. *General Aviation Aircraft Design : Applied Methods*. 2013.
- [13] Mark D Sensmeier and Jamshid A Samareh. A Study of Vehicle Structural Layouts in Post-WWII Aircraft. Technical report.
- [14] Antonov Airlines — A Leader Within The Air Freight Industry.